

---

## 5.1 Konstruktion

Die Konstruktion stellt einen wichtigen Teilbereich der Produktentwicklung dar und befasst sich primär mit der Konzipierung und Gestaltung von Produkten (Ehrlenspiel 2009; Ponn und Lindemann 2011). Sie grenzt sich zu anderen Teilprozessen der Produktentwicklung (Berechnung, Simulation, Prototypenbau und Test) ab.

Wie sich die Entwicklung/Konstruktion in den Gesamtlebenszyklus eines Produktes eingliedert, kann der Abb. 5.1 entnommen werden.

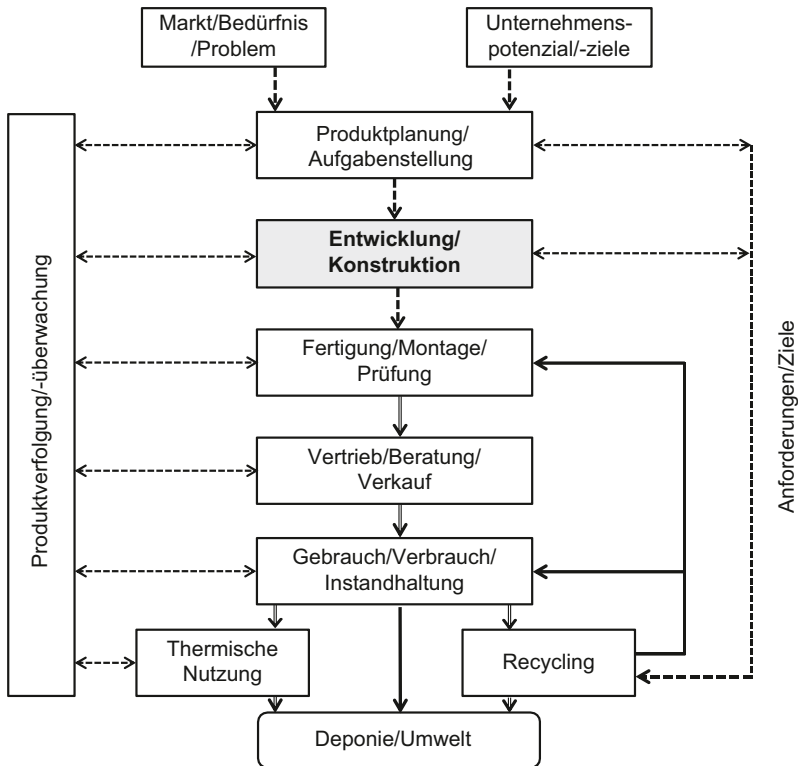
Handelt es sich dabei um eine Neukonstruktion, bedeutet dies, dass bei einer neuen oder auch nur wenig geänderten Aufgabenstellung nach neuen Lösungsprinzipien gesucht werden muss. Das heißt, dass alle Phasen der Konstruktion des gesamten Produktes bzw. eines Bauteils oder Bauteilgruppe neu unter Einbeziehung physikalischer und verfahrenstechnischer Grundlagen, sowie technischer und wirtschaftlicher Aufgabenklärung neu zu durchlaufen sind. Eine generelle Vorgehensweise basiert auf der VDI 2221 (1993) (s. Abb. 5.2)

Bezüglich des Gesamtkonzeptes für ein Produkt sind 2 Teilkonzepte zu berücksichtigen (vgl. Pahl et al. 2007), die sich wiederum gegenseitig beeinflussen:

- a. Wirkkonzept (die für die Funktionserfüllung notwendigen physikalischen Effekte bzw. deren Zusammenwirken, Werkstoffe und Gestaltung der Wirkflächen) und
- b. Gestaltungskonzept (Hauptabmessungen und -gestaltung sowie die Zuordnung der Teilelemente unter Berücksichtigung des Hauptflusses und evtl. Nebenflüsse).

### Modell der „Gerechtheiten“ nach Ponn und Lindemann (2011)

Die *Gestalt des Produktes* lässt sich durch gestaltbezogene Eigenschaften beschreiben. Hierzu kann das Modell der „Gerechtheiten“ nach Ponn und Lindemann (2011) eine Orientierung geben (vgl. Tab. 5.1).



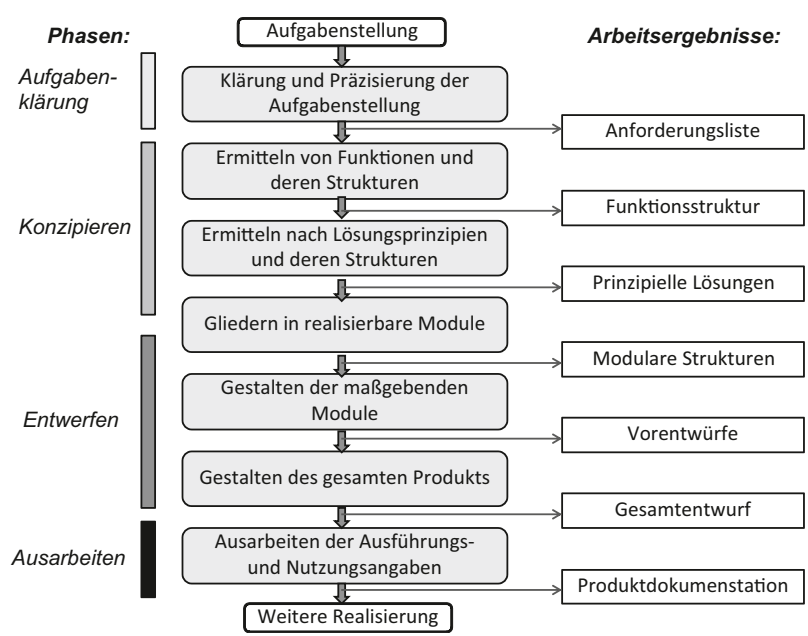
**Abb. 5.1** Lebenslauf eines Produktes. (Mod. nach Pahl et al. 2007)

Auf den ersten Blick ist zu erkennen, dass für Sportartikel den folgenden Eigenschaften eine besondere Bedeutung zukommt: sicher, ergonomiegerecht, zuverlässig und normgerecht.

Wie die Gesamtgestalt sich aus verschiedenen Sichtweisen zusammensetzt, illustriert die Abb. 5.3.

Die Gestaltung eines Produktes Sportgerät soll nachfolgend am Beispiel eines Klappfahrrades erläutert werden (Ponn und Lindemann 2011). Ziel dieser Konstruktion war es Größe, Gewicht und Preis zu reduzieren. Diese Anforderung ergab sich insbesondere durch die Nutzergruppe Freizeitsportler, die das Fahrrad für den innerstädtischen Gebrauch benutzen wollten. Die Lösungskonzepte bezogen sich auf die Rahmenkonstruktion (s. Abb. 5.4).

Nach der Entscheidung für die Variante „Konzept 3“ (Realisierung des Zusammenklappens durch Drehbewegungen um zwei vertikale Achsen) wurde das CAD-Modell konstruiert und mögliche Fertigungsvarianten ermittelt. Favorisiert wurden dabei als das einfachste Verfahren die Umformung eines Rundrohres zum Ovalquerschnitt und ein



**Abb. 5.2** Generelles Vorgehen beim Konstruieren nach VDI-Richtlinie 2221

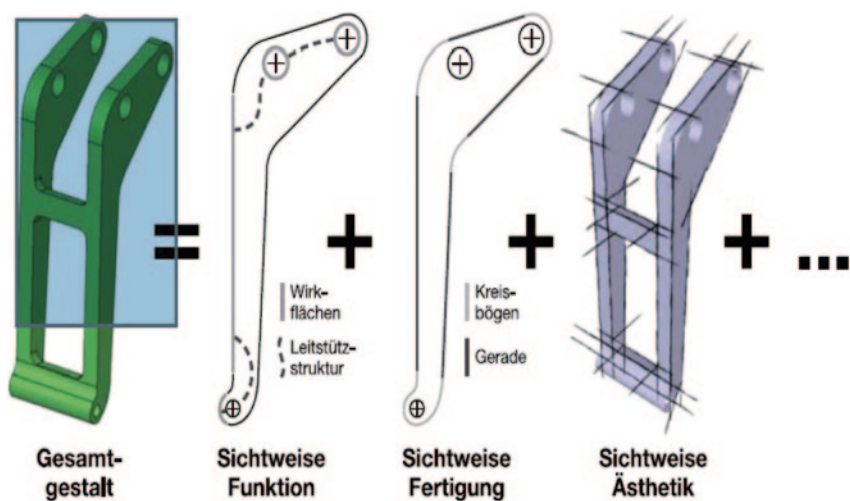
**Tab. 5.1** Übersicht über ausgewählte „Gerechtheiten“ nach Ponn und Lindemann (2011)

Sicher	Demontagegerecht	Ergonomiegerecht	Wartungsgerecht
Kostengünstig	Nachhaltig	Ästhetisch	Instandhaltungsgerecht
Geräuscharm	Verschleißgerecht	Zuverlässig	Benutzerfreundlich
Langlebig	Werkstoffgerecht	Fertigungsgerecht	Variantengerecht
Ausdehnungsgerecht	Montagegerecht	Gewichtsreduziert	Risikogerecht
Reinigungsgerecht	Korrosionsgerecht	Logistikgerecht	Lieferzeitgerecht
Formgebungsgerecht	Reparaturfreundlich	Normengerecht	Robust

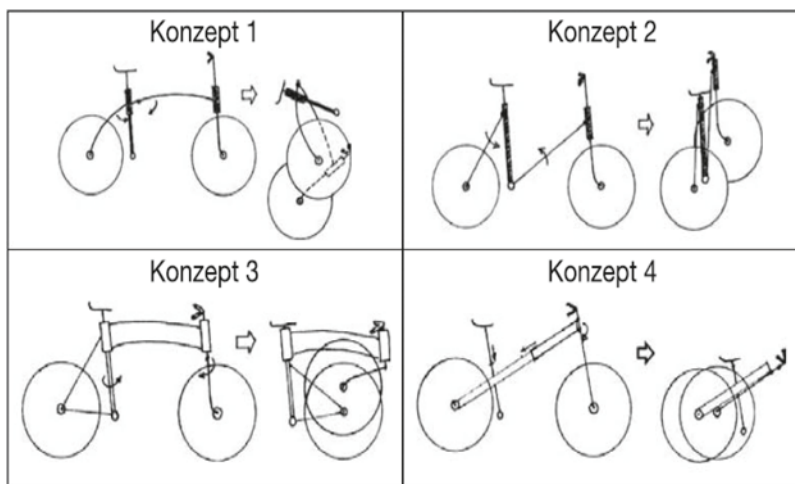
anschließendes Radiusbiegen (vgl. Abb. 5.5). Den funktionsfähigen Prototypen zeigt die Abb. 5.6.

Eine wesentliche Herangehensweise bei der Konstruktion eines technischen Produktes ist die Betrachtung des Energie-, Stoff- und Signalflusses. Je nach Aufgabenstellung ist einer dieser Flüsse vorherrschend (Colani et al. 2011), wobei entsprechend des Haupt- und Nebenflusses zwischen Hauptfunktion und Nebenfunktion unterschieden werden kann (vgl. Abb. 5.7).

Dabei werden Teilfunktionen in der Regel von physikalischen Effekten ermöglicht. Daraus resultieren dann physikalische Wirkprinzipien. Beispiele werden in der Abb. 5.8 gegeben.

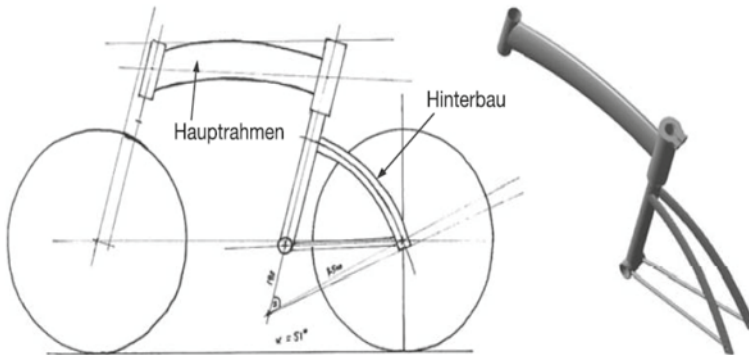


**Abb. 5.3** Zusammenführung verschiedener Produktgestalt-Sichten. (Lemburg 2009 in Ponn und Lindemann 2011)



**Abb. 5.4** Lösungskonzepte für den Faltmechanismus des Rahmens eines Klappfahrrades. (Ponn und Lindemann 2011)

Für die systematische Untersuchung der physikalischen Effekte und ihre Ausnutzung bei der Konstruktion kann nach der Übersicht in der Abb. 5.9 vorgegangen werden.



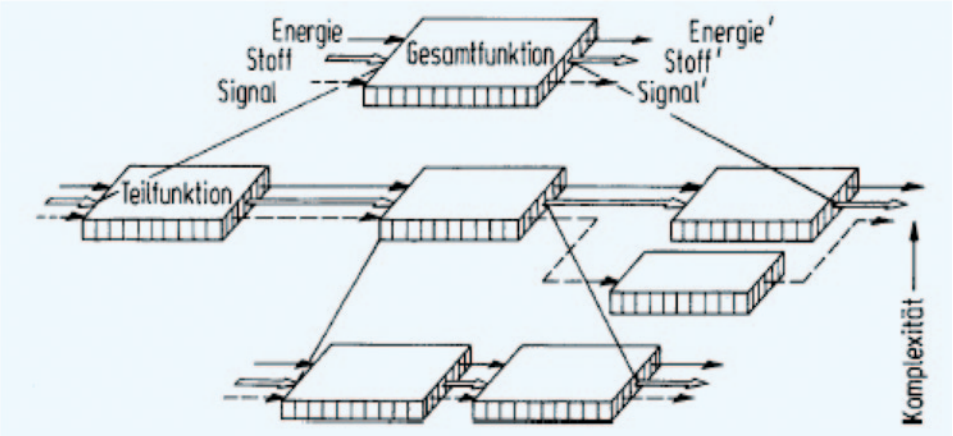
**Abb. 5.5** Lösungskonzept 3 für die Gestalt des Fahrradrahmens (Ponn und Lindemann 2011) mit Klappmechanismus am hinteren Teil des Fahrrades. Der Rahmen besteht hier aus zwei unabhängigen Teilen, dem Hauptrohr und dem Hinterbau: Sattelrohr und Hinterbau werden zum Zusammenklappen um die Sattelachse gedreht (Kombination aus Reibschluss und Formschluss). (Quelle: Müller 2004; in Ponn und Lindemann 2011)



**Abb. 5.6** Funktionsfähiger Prototyp des Klappfahrrades (entsprechend dem Lösungskonzept 3). (Quelle: Müller 2004; in Ponn und Lindemann 2011)

### Schlussfolgerungen für die Konstruktion von Sportgeräten

Der Produktionsprozess für Sportgeräte entspricht allgemein der VDI-Richtlinie 2221 (1993). Dabei sollte ein wesentliches Augenmerk auf die Energie-, Stoff- und Signalflüsse gelegt werden, wobei zwischen Haupt- und Nebenfunktionen zu unterscheiden ist. Für Lösungskonzepte von Teilfunktionen steht eine Vielzahl von physikalischen Effekten zur Verfügung. Der Konstrukteur hat diese entsprechend seiner Zielsetzung zu prüfen.



**Abb. 5.7** Bilden einer Funktionsstruktur mit Energie-, Stoff- und Signalfluss durch Gliedern einer Gesamtfunktion in Teilfunktionen. (Quelle: Colani et al. 2011)

Teilfunktionen	Physikal. Effekte (lösungsneutral)	Wirkprinzipien für eine Teilfunktion (phys. Effekte sowie geometrische und stoffliche Merkmale)
	<p>Reibungseffekt</p> $F_R = \mu F_N$	
	<p>Hebeleffekt</p> $F_a a = F_b b$	
	<p>Ausdehnungseffekt</p> $\Delta l = \alpha l \Delta \vartheta$	

**Abb. 5.8** Teilfunktionen und ihre Lösung durch physikalische Effekte. (Quelle: Colani et al. 2011)

<b>Mechanik</b>	Gravitation	Trägheit	Fliehkraft	Tribologie
	Elastizität	Dämpfung		
<b>Hydraulik</b>	Hydrostatisch	Hydrodynamisch		
<b>Pneumatik</b>	Aerostatisch	Aerodynamisch		
<b>Elektrik</b>	Elektrostatisch	Elektrodynamisch	Induktiv	Kapazitiv
<b>Magnetik</b>	Ferromagnetisch	Elektromagnetisch		
<b>Thermik</b>	Wärmeleitung	Ausdehnung	Wärmeübertr.	Wärmeisolierung
<b>Optik</b>	Reflexion	Brechung		

**Abb. 5.9** Ordnende Gesichtspunkte und Merkmale zur Variation auf der physikalischen Suche auf der Basis der physikalischen Teilbereiche. Hinzu kommt auch noch die biologische Betrachtungsebene. (Mod. nach Colani et al. 2011)

## 5.2 Materialien

Materialien und deren funktionsgerechte Anwendung sowie Verarbeitung sind eine wesentliche Grundlage für zuverlässiges Konstruieren (Roos und Maile 2011). Durch ihre Entwicklung ist es möglich, neue Produkte herzustellen bzw. deren Eigenschaften zu beeinflussen. Dies trifft auch für Sportartikel zu. Bei der Wahl des Werkstoffes sind folgende Kriterien zu berücksichtigen (Roos und Maile 2011):

- Verarbeitbarkeit des Werkstoffes,
- Gewährleistung einer ausreichenden Sicherheit für den Dauerbetrieb,
- Umweltfreundlichkeit,
- Kosten.

Als makroskopische, mechanische Eigenschaften sind Festigkeit und Verformbarkeit zu nennen. Sie bestimmen einerseits die Widerstandsfähigkeit gegenüber äußeren Kräften und sind andererseits wichtig für die Verarbeitung. Bezüglich der Verformbarkeit kann man zwischen reversibler und irreversibler Verformung unterscheiden. Entsprechend geben Elastizitätsmodule Auskunft über das Elastizitätsverhalten der Werkstoffe. Mit Hilfe

von Zug-, Druck-, Biege- und Torsionsversuchen lassen sich die entsprechenden Kennwerte der Werkstoffe ermitteln.

Der Werkstoff Kunststoff nimmt weltweit an Bedeutung zu (Roos und Maile 2011), so auch für Sportartikel. Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen werden durch Aufbau und Größe der Makromoleküle, durch den Vernetzungsgrad sowie durch die Art der Herstellung bestimmt. Weiterhin werden sie von den Umgebungsbedingungen beeinflusst. Im Unterschied zu Metallen weisen sie eine niedrigere Dichte auf, wodurch die Masse von den herzustellenden Produkten deutlich reduziert wird. Sie besitzen außerdem ein hohes Dämpfungsvermögen, aber meist auch einen hohen elektrischen Widerstand und geringe Wärmeleitfähigkeit.

Die spezifischen Anforderungen des zu entwickelnden Produktes kann oft ein reiner Werkstoff nicht erfüllen. Deshalb werden sehr oft Verbundwerkstoffe, wie es auch die nachfolgenden Beispiele zeigen, verwendet. Verbundwerkstoffe sind dadurch charakterisiert, dass Kombinationen aus mehreren Werkstoffarten (metallisch, organisch, anorganisch) so optimiert werden, dass die gewünschten Eigenschaften erzielt werden. Diese Eigenschaften können sein: spezifische Festigkeit, spezifische Steifigkeit, geringe Dichte, Temperatur-, Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit, Risszähigkeit und günstige Wärmeausdehnung und Wärmeleitfähigkeit. Verbundwerkstoffe werden in Schichtverbunde, Faserverbunde und Teilchenverbunde eingeteilt (Roos und Maile 2011). Im Allgemeinen können Fasern (zur Steigerung von Festigkeit und Steifigkeit) und Matrixwerkstoffe (dienen der Einbettung und dem Schutz der Fasern) auf verschiedene Weise miteinander kombiniert werden. Neben der Faser-Matrix-Kombination können aber auch Faserwinkel, Faservolumenanteil, Schichtreihenfolge und vieles mehr variiert werden (Roos und Maile 2011).

Generell lassen sich folgende Faserverbundwerkstoffe unterscheiden:

- Faserverstärkte Kunststoffe,
- Faserverstärkte Metalle (MMC, Metal Matrix Composite) und
- Faserverstärkte Keramik (CMC, Ceramic Matrix Composite).

Ein *faserverstärkter Kunststoff* (auch: Faser-Kunststoff-Verbund FKV oder Faserverbundkunststoff FVK) besteht aus Verstärkungsfasern und einer Kunststoffmatrix. Die Matrix umgibt die Fasern, die durch Adhäsiv- oder Kohäsivkräfte an die Matrix gebunden sind. Durch die Verwendung von Faserwerkstoffen haben Faser-Kunststoff-Verbunde ein richtungsabhängiges Elastizitätsverhalten. Die Bedeutung des Matrixwerkstoffes ist darin zu sehen, dass ohne sie die hohen spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten der Verstärkungsfasern nicht nutzbar sind. Erst durch die geeignete Kombination von Faser- und Matrixwerkstoff entsteht ein neuer Konstruktionswerkstoff. Die hohen spezifischen Steifigkeiten und Festigkeiten macht sie zu geeigneten Werkstoffen in Leichtbauanwendungen. Aus Faser-Kunststoff-Verbunden werden überwiegend flächige Strukturen hergestellt.

Bei den *faserverstärkten Metallen* (MMC, Metal Matrix Composite) werden anstelle von Kunststoff Metalle als Matrixwerkstoff verwendet. Dadurch werden im Allgemeinen folgende Eigenschaften verbessert: Temperaturbeständigkeit, Kraftübertragung zwischen Matrix und Faser, Zähigkeit und Härtebarkeit (Roos und Maile 2011). So erreichen bspw.



bor- und kohlenstofffaserverstärkte Aluminium-Verbundwerkstoffe wesentlich höhere mechanische Belastungseigenschaften als ausgehärtete Aluminiumlegierungen. Allerdings ist die Herstellung schwierig, da sehr hohe Temperaturen benötigt werden, damit das Aluminium die Fasern vollständig benetzen kann. Anwendungen sind insbesondere bei Bauteilen, die thermisch hoch beansprucht werden, zu finden (Roos und Maile 2011).

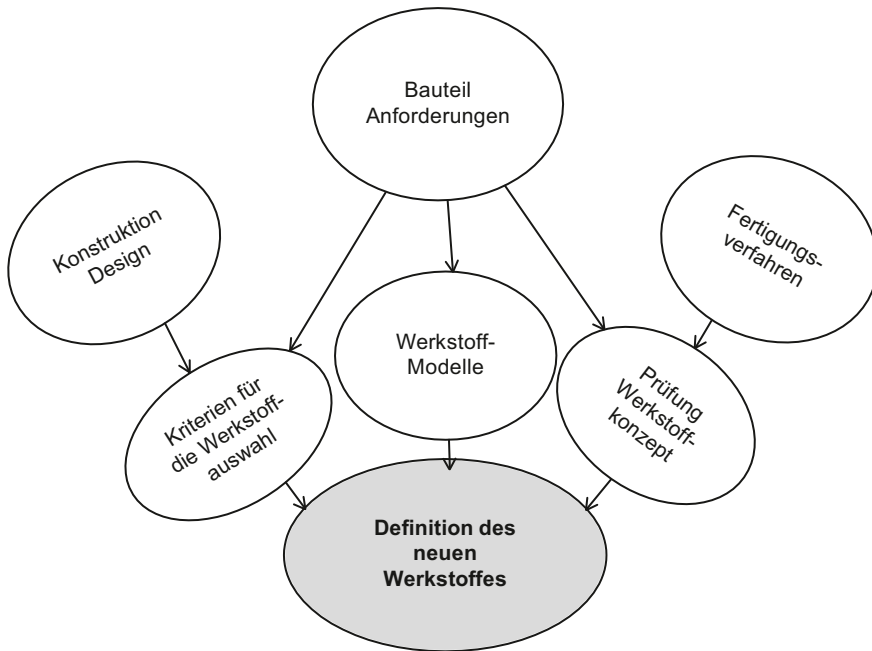
*Faserverstärkte Keramik* (CMC, Ceramic Matrix Composite) zeichnet sich gegenüber den oben beschriebenen Verbundwerkstoffen durch chemische Beständigkeit und hohe Härte aus. Daraus ergeben sich auch eine erhöhte Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Die damit verbundene Sprödigkeit kann sich aber auch nachteilig auswirken (Roos und Maile 2011). Dieser Nachteil wird mit Hilfe von Fasern ausgeglichen, die die Zugbelastungen aufnehmen und Rissbildungen verhindern sollen. Als Eigenschaften von faserverstärkten Keramiken können genannt werden: hohe Festigkeit und Steifigkeit auch bei hohen Temperaturen (bis zu 1000 °C), Verschleiß- und Thermoschockbeständigkeit sowie pseudoplastisches Bruchverhalten (Roos und Maile 2011).

Neben den oben beschriebenen faserverstärkten Verbundwerkstoffen gehören zu den Verbundwerkstoffen Teilchenverbundwerkstoffe (z. B. Metallkeramik, Cermets), Schichtverbundwerkstoffe (bestehen aus zwei oder mehreren Schichten bzw. Komponenten zur Verbesserung der Korrosionsschutzes, des Verschleißes und Variation des thermischen Ausdehnungsverhaltens) und mit verschiedenen Beschichtungstechniken hergestellte andere Verbundwerkstoffe (Roos und Maile 2011).

In Bezug auf Sportgeräte spielen sowohl die verschiedenen mechanischen Eigenschaften als auch tribologische Eigenschaften eine wichtige Rolle, insbesondere in dem Sinne, dass Abnutzung infolge von Reibung im Allgemeinen vermieden werden soll, um die Lebensdauer zu erhöhen. Aus diesem Grunde wird immer wieder versucht, die Vorteile neuer Materialien diesbezüglich zu nutzen. So kommen immer mehr Faserverbundwerkstoffe mit Carbonfasern zum Einsatz. Dies ist der geringeren Masse bei Beibehaltung der mechanischen Festigkeitseigenschaften geschuldet. So sind sie in Tennisschlägern, Booten, Fahrrädern und Bobs zu finden. Am Beispiel des Rennbootes soll gezeigt werden, wie durch die Bauweise und gezielte Verwendung von Faserverbundwerkstoffen die gewünschten Eigenschaften des Bootes erreicht werden. Ein erfolgreicher Hersteller von Rennbooten für den Hochleistungsbereich und den Breitensport ist die Firma Win Tech-Racing.<sup>1</sup> Diese Firma verwendet für die Breitensport-Variante „Club Racer“ Glasfaserlaminat. Eine zusätzliche Kohlefaserverstärkung ist in der Bordwand und längs der Kiellinien in einer Waben-Sandwichbauweise zu finden. Die Erhöhung der Bootssteifigkeit wird beim Hochleistungsboot „Medalist“ durch eine Sandwichkonstruktion unter der Verwendung von unidirektionalen, vorimprägnierten Kohlefasern mit einem Kern aus Nomex-Waben erreicht. Dadurch wird das gesamte Boot sehr robust.<sup>2</sup> Ein bedeutender Unterschied beider Boote ist auch die Masse. Während der „Medalist“ die FISA-Mindestmasse von 14 kg erreicht, ist das Breitensportboot 18,5 kg schwer.

<sup>1</sup> Firma Win Tech-Racing (vgl. <http://www.wintechracing.com/index.php>, Zugriff: 02.10.2012).

<sup>2</sup> [http://www.oarsport.de/products/wintech\\_construction.php](http://www.oarsport.de/products/wintech_construction.php) (Zugriff: 02.10.2012).



**Abb. 5.10** Wesentliche Kriterien, die bei der Werkstoffauswahl zu berücksichtigen sind. (Mod. nach Roos und Maile 2011)

Zusammengefasst zeigt die Abb. 5.10 die wichtigsten Kriterien, die bei der Werkstoffauswahl zu berücksichtigen sind.

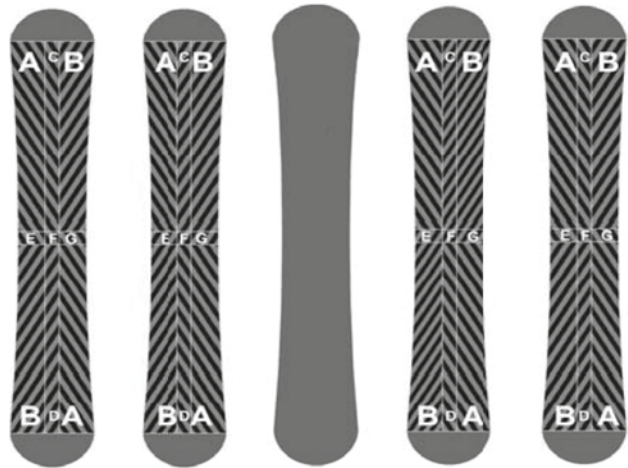
Nachfolgend soll exemplarisch der gezielte Einsatz moderner Materialien für Sportartikel gezeigt werden.

Ein Beispiel ist die Verwendung eines faserverstärkten Metalls (Irander und Berglund 2006). Hierbei handelt es sich um ein Gemisch aus korrosionsbeständigem Stahl und einem chemischen Komposit: 12%Cr/9%Ni/4%Mo/2%Cu mit dem Handelsnamen Sandvik Nanoflex®. Als mechanische Eigenschaften werden große Härte, vergleichsweise geringes Gewicht und gute Formbarkeit hervorgehoben. Diese werden durch die Einlagerung von Nanopartikeln in das Matrixmaterial Stahl erreicht. Als mögliche Anwendungen im Sport werden die Schiene für Fahrradsattel und Teile für Kletterausrüstung angegeben (Irander und Berglund 2006).

Ein karbonfaserverstärkter Kunststoff (CFRP) kann auch für den Rahmen eines Hochleistungsrennrades verwendet werden (Kaiser und Himmel 2006). Bei dem Vergleich mit den sonst üblichen Materialien Stahl, Titan und Aluminium zeichnet sich dieser Werkstoff durch geringere Dichte, Dehnungs- und Schermodule aus.

Die Ausnutzung der Faserrichtung bzw. die unterschiedliche Anordnung der Fasern von faserverstärkten Kunststoffen wurde in dem sogenannten ALD-Snowboard realisiert, wobei ALD für „anisotropic layer design“ steht (Kaufmann et al. 2010). Damit kann der Kan-

**Abb. 5.11** Individuelle Schichten mit unterschiedlichen Faserorientierungen eines ALD-Snowboards. (Quelle: Kaufmann et al. 2010)



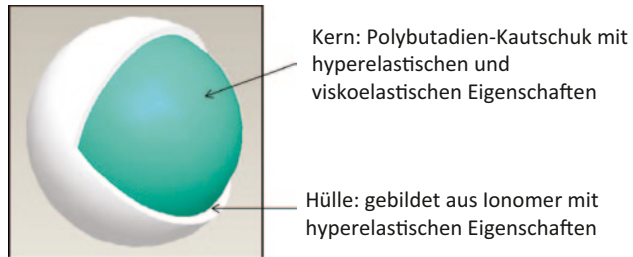
teneffekt des Snowboards den Ansprüchen des Sportlers vom Anfänger bis zum Experten angepasst werden. Die Abb. 5.11 zeigt die unterschiedliche Anordnung der Fasern für die Ober- und Unterseite. Einerseits kann dadurch die Kante zusätzlich in den Schnee gedrückt werden, wodurch Stabilität und Kantenerhalt erhöht werden und der Boarder weniger Kraft benötigt, aber gerade beim Durchfahren von Kurven über mehr Sicherheit verfügt. Andererseits biegt sich beim Boardslide das Board durch das Gewicht des Sportlers in die entgegengesetzte Richtung, die Kanten heben sich an und die Gefahr des Verkantens wird vermindert (Kaufmann et al. 2010).

Karbonfaser-Werkstoffe werden u. a. häufig bei Golfschlägern eingesetzt. Es sollte jedoch beachtet werden, dass nicht jede bemerkbare Änderung der Eigenschaften des Schlägers auf veränderte Lage und Dichte der Karbonfasern zurückgeführt werden kann (Slater et al. 2010). Es ist aber davon auszugehen, dass die Dämpfung von der Karbonfaser-Orientierung abhängt.

Für die Materialoptimierung ist der Einsatz von Modellen üblich. Die Notwendigkeit der Überprüfung der Ergebnisse von Modellierungen durch empirische Untersuchungen wird auch am Beispiel der Bestimmung des Einflusses verschiedener Materialien auf das dynamische Verhalten eines Skis deutlich. Die Finite-Elemente-Modell (Fischer et al. 2006) zeigte im Vergleich zu den empirischen Tests die besten Übereinstimmungen bei den ersten beiden Schwingungsmoden.

Modellierungen können bspw. mit numerischen Methoden erfolgen, um Materialeigenschaften zu testen. So können Kontaktbelastungen bei Polymeren, wie sie bei Softbällen eingesetzt werden, durch die Bestimmung von dynamischer Steifheit und Energieabsorption charakterisiert werden (Bryson und Smith 2010). Der Vergleich mit empirischen Untersuchungen an einer Hopkinson-Druckmaschine zeigte jedoch, dass die elastischen Eigenschaften nicht ausreichend sind, damit die numerischen Modelle die Kollisionseigenschaften hinreichend beschreiben. Zukünftig sollten Material-Hystereseeigenschaften mit in die Modellierung eingebunden werden.

**Abb. 5.12** Aufbau eines Golfballes aus zwei Teilen mit unterschiedlichen Materialien. (Mod. nach Pugh et al. 2010)



FE-Modelle wurden auch für Bälle entwickelt, die vornehmlich aus einem Material bestehen, wie bspw. ein Hockey-Ball (Ranga und Strangwood 2010). Als Input-Parameter wurden hier die elastischen bzw. hyperelastischen und anderen mechanischen Eigenschaften des Materials verwendet, um das quasi-statische und dynamische Verhalten des Balls zu beschreiben. Dass das Kontaktverhalten (quantifiziert mit COR als dem Verhältnis der Geschwindigkeiten vor und nach dem Auftreffen) von der inneren Reibung des Materials abhängt, belegen weitere Untersuchungen (Collins et al. 2010).

Die Einbeziehung eines zweiten Materials in die Modellierung wurde für einen Golfball, bestehend aus zwei Teilen, realisiert (Abb. 5.12). Der Schwerpunkt wurde auf das Kontaktverhalten gelegt, das durch verschiedene Belastungsarten in Form von Kontaktzeiten vorgegeben wurde. Für die Berücksichtigung unterschiedlicher Materialeigenschaften wurde das Bergstrom-Boyce-Modell zur Beschreibung rheologischer Eigenschaften von Kautschuken kombiniert mit einem FE-Modell angewendet. Zusätzlich wurden empirische Materialtests durchgeführt (Pugh et al. 2010).

Auch die Anwendung von CAD-Modellen für Materialien ist bekannt. Als Beispiel seien Snowboardbindungs-Materialien genannt. Hierbei wurde insbesondere die Torsionssteifigkeit berücksichtigt (Clifton et al. 2010). Sandwich-Konstruktionen dienen der Optimierung des Designs.

Moderne Materialien werden auch in Sporttextilien vermehrt verwendet. Die Notwendigkeit hierfür resultiert aus den spezifischen Anforderungen moderner Sporttextilien. Die Tab. 5.2 enthält eine Zusammenfassung von Anforderungen und Lösungsmöglichkeiten.

Speziell soll auf die sogenannten Funktionstextilien eingegangen werden, die im Sport von besonderer Bedeutung sind. Unter Funktionstextilien versteht man Kleidung, die unter physiologischem Aspekt die Thermoregulation des Menschen nicht behindert, sondern unterstützt (Knecht 2003).

Zur Realisierung textiler Innovationen und deren grundlegendes Verständnis werden nachfolgend wesentliche bekleidungsphysiologische Grundlagen erläutert.

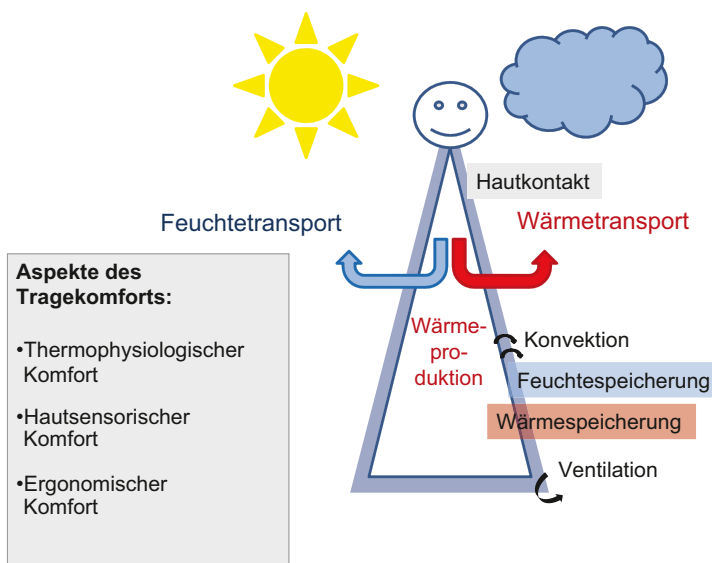
Unter Bekleidungsphysiologie ist allgemein das Wissen um die planmäßige Konstruktion funktioneller Kleidung zu verstehen (Mecheels 1998). Aspekte des Tragekomforts sowie die Energiebilanz des menschlichen Körpers sind in der Abb. 5.13 dargestellt. Dabei kommt dem thermophysiologischen Komfort eine besondere Bedeutung zu, insbesondere unter dem Aspekt, dass im Hochleistungssport mit einem Leistungsumsatz von bis zu 800 Watt im Unterschied zum Leistungsumsatz beim Gehen ( $v=4,0$  km/h) von 280 Watt zugehen ist (Mecheels 1998, S. 18).

**Tab. 5.2** Anforderungen und Lösungsmöglichkeiten moderner Textil-Materialien

Anforderungen	Spezifische Merkmale	Lösungsmöglichkeiten
Passform	Enganliegend, „zweite Haut“	Elastanfasern
	Bewegungsfreiheit	
	Wohlbefinden	
	Bleibende Elastizität auch bei Belastung und in Verbindung mit Wasser	
UV-Schutz	UV-schützende Materialien, die aber nicht zu dick sind	Nylon
		Einweben von speziellen UV-absorbierenden Fasern
Winddichte	Winddichte bei Aufrechterhaltung der Atmungsaktivität	Windblocker-Textilien je nach Hersteller,
		Beschichtung von außen
		Imprägnierung
Wasserdichte	Verhinderung des Transports von Feuchtigkeit von außen nach innen	Verwendung spezieller Folien
	Wasserdicht bedeutet: Undurchlässigkeit von 1,3 mm Wassersäule	
Atmungsaktivität	Erhalt der Atmungsaktivität zur Aufrechterhaltung der Körpertemperatur Abtransport erhöhter Schweißmenge	Spezielle Membranen
Antistatik	Synthetische Stoffe (z. B. Mikrofasern) neigen zur elektrischen Aufladung	Hinzufügen von Tensiden (wasserbindend und oberflächenaktiv)
		Metallische Fäden (Verminderung des Oberflächenwiderstandes)
Pflegeleichtigkeit	Normale Waschvorgänge müssen möglich sein	
	Schmutzabweisend	
	Erhalt der Funktionen soll gewährleistet werden	
Kombination	Tragen von mehreren Schichten (Unterwäsche, Trikot, Jacke)	Softshells, die als zweite Schicht bereits die Funktionen der dritten übernehmen

Die vom Körper gebildete Wärme kann auf drei Wegen an die Umgebung abgeführt werden (Mechels 1998, S. 19):

- über die Atemluft (Respiration) in den Lungen,
- über die Haut als „trockener“ Wärmefluss und
- über die Haut als Verdampfungswärmefluss.

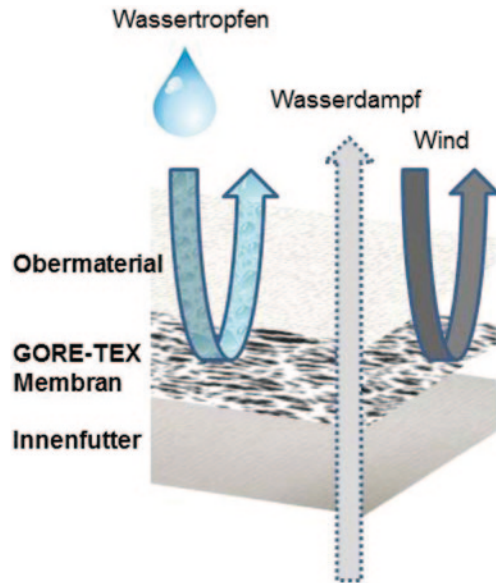


**Abb. 5.13** Schematische Darstellung der Energiebilanz des menschlichen Körpers. (Mod. nach Umbach in Knecht 2003, S. 45)

Da die Wärmeabgabe zu 90 % über die Haut erfolgt, muss die Kleidung entsprechende Funktionen erfüllen. Das bedeutet für viele Sportarten, dass die Bekleidung möglichst atmungsaktiv zu sein hat. Es konnte am Beispiel des Radfahrens nachgewiesen werden, dass sich die Herzfrequenz beim Tragen von atmungsaktiver Kleidung im Unterschied zu weniger atmungsaktiver Kleidung reduziert (Knecht 2003, S. 44).

Da die Kleidung auf die Temperaturregelung des Menschen einen entscheidenden Einfluss hat, kann sie als quasiphysiologisches System betrachtet werden. Dabei sind Wärmeisolation und Wasserdampfdurchgangswiderstand die beiden wichtigsten Eigenschaften der Kleidung, mit denen sie Einfluss auf die Temperaturregelung des Menschen nimmt. Interessant hierbei ist, dass der eigentliche Wärmeisolator der Kleidung nicht Fasern oder Garne sind, sondern die darin eingeschlossene und festgehaltene Luft. Damit ist weiterhin eine „Bauschkraft“ der Textilien notwendig, die die Dicke der Textilien bei Bewegungen (z. B. an den Gelenken) möglichst konstant hält. Insbesondere bei sportlichen Bewegungen bei höchster körperlicher Anstrengung muss die Kleidung so wasserdampfdurchlässig sein wie möglich. Damit werden der Wärmetransport nach Außen und ein unangenehmer Feuchtestau verhindert. Entsprechend müssen die verwendeten Textilien zwar gegen äußere Einwirkungen (Regen) wasserabweisend sein, jedoch den Wasserdampf von Innen nach Außen hindurch lassen. Die Abb. 5.14 verdeutlicht diesen Mechanismus am Beispiel der Gore-Tex®-Membran. Derartige atmungsaktive Textilien können unterschiedliche Konstruktionsprinzipien haben. Hierbei handelt es sich um eine PTFE- bzw. Teflon-Membran, mit der andere Teile von Funktionstextilien beschichtet werden. Sie verfügt über

**Abb. 5.14** Thermophysiologische Funktion von Sportbekleidung. (Mod. nach Knecht 2003, S. 44)



eine große Wasserdichtheit auf Grund ihres Aufbaus. Die mikroskopisch kleinen Poren (20.000-mal kleiner als ein Wassertropfen aber 700-mal größer als ein Wassermolekül) erlauben den Schweißabtransport und verhindern das Eindringen von Wassertropfen.

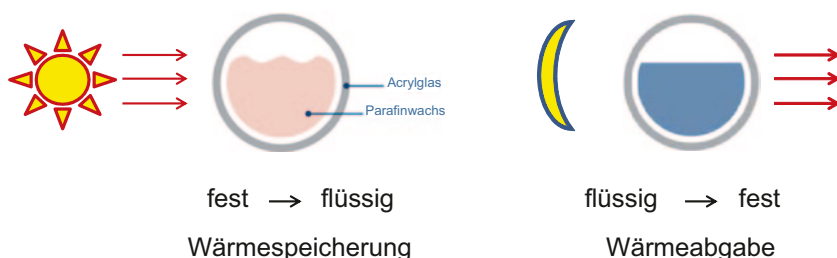
So haben sich für Textilien, die als einzige Schicht am Körper getragen werden (Fußball-Shirts, Bodies), zweiflächige Konstruktionen aus Synthetics mit Kapillarverengung (Denier-Gradient) bewährt, welche nach dem Prinzip der Erhöhung der Saugwirkung durch Verengung der Kapillaren von Innen nach Außen arbeiten (Umbach in Knecht 2003, S. 52). Bei Verwendung als Unterwäsche kann es dennoch zu einem Feuchtestau kommen, so dass zweiflächige Systeme nach dem Double-Face-Prinzip empfehlenswert sind (Umbach in Knecht 2003, S. 53).

Bereits aus diesen Beispielen wird deutlich, wie wichtig es ist, moderne Techniken in der Faserspinnerei zu nutzen, um Fasern nach Maß (Hohlfasern, Fasern mit modifiziertem Querschnitt) und Gewebe mit beigemischten Stoffen (Keramikpartikel für Lichtschutz, Silberionen zur geruchshemmenden Bakterienvernichtung, Metalle zur Reduzierung elektromagnetischer Felder) zu produzieren.

Zur Quantifizierung des Tragekomforts unter dem Aspekt der Kleidungsphysiologie werden vom Bekleidungsphysiologischen Institut (BPI) Hohenstein e. V.<sup>3</sup> die Gliederpuppen „Charlie“ und „Charlene“ verwendet. Mit diesen Thermoregulationsmodellen des Menschen wird die Wärmeproduktion von Erwachsenen und Kindern nachgestellt. Damit können Bekleidungs- und Ausrüstungsgegenstände hinsichtlich ihres thermischen Komforts geprüft werden.

<sup>3</sup> Hohenstein Institute (<http://www.hohenstein.de/de/home/home.xhtml>. Zugriff: 03.10.2012).





**Abb. 5.15** PCM-Technik (Phase-Change-Materials)-Technik

Als ein weiteres Beispiel für eine Funktionsfaser soll die SmartCell-Faser<sup>4</sup> angeführt werden. Hierbei wird natürliches Paraffin (aus der Natur insbesondere vom Eisbären abgegraben) eingesetzt. Paraffin sorgt für ein gleichbleibendes Klima, da es überschüssige Körperwärme speichern kann und bei Bedarf wieder abgibt. So können aktuell mikroskopisch kleine Paraffinkapseln in das Gewebe eingebaut werden, um die beim Sport entstehende überschüssige Körperwärme aufzunehmen und diese in Phasen der Ruhe dem Körper wieder abzugeben (s. Abb. 5.15). Das Prinzip basiert darauf, dass die Paraffinkügelchen zum Schmelzen viel Wärme verbrauchen, wodurch der Kühleffekt entsteht. Beim Erstarren (z. B. am Abend) wird die gespeicherte Wärmeenergie wieder abgegeben. Damit bleibt die Kleidung noch angenehm warm.

Es gibt noch viele weitere spezielle Textilentwicklungen, von denen nur einige genannt werden sollen: Speedo Fastskin FS II in Anlehnung an die Haifischhaut zur Verringerung des Wasserwiderstandes (wurde jedoch 2008 durch das Reglement ausgeschlossen) und Clima-Cool-Technologie von Adidas.

In den Tabellen 5.3 und 5.4 sind die Anforderungen der Textilien für die einzelnen Sportarten zusammengefasst. Inwiefern auch das Reglement das Tragen von Textilien beeinflusst, zeigt das Beispiel des Skisprung-Anzuges. Hier sind u. a. Stärke des Stoffes, Gewicht, Elastizität und gleiche Luftdurchlässigkeit an allen Körperteilen vorgeschrieben.<sup>5</sup> Um einen „Balloneffekt“ möglichst zu verhindern, darf der Anzug maximal 6 cm mehr Umfang haben, als das von ihm eingekleidete Körperteil.

Der Einsatz moderner Materialien wird auch bei den Schuhen deutlich. So wird bspw. beim Wanderschuh das natürliche Material Leder zunehmend durch andere Materialien abgelöst, die ebenfalls Atmungsaktivität bzw. Feuchteregulation aufweisen. Auch hier wird bspw. die Gore-Tex-Membran eingesetzt.

Dass nicht nur die Wahl des Materials, sondern auch seine Herstellung für die Praxis von Bedeutung ist, zeigt sich am Beispiel verschiedener Laminationsverfahren von Verbundwerkstoffen im Sportbootbau (Andernach 2008). Hierbei werden die üblichen Methoden: Handlaminieren, Vakuumverfahren und Harzinjektionsverfahren miteinander

<sup>4</sup> <http://www.smartfiber.de>. Zugriff: 15.02.2012.

<sup>5</sup> Vgl. Regelwerk <http://www.fis-ski.com/de/disciplines/skispringen/>. Zugriff: 03.10.2012.



**Tab. 5.3** Sommersportarten und ihre Anforderungen an die Bekleidung

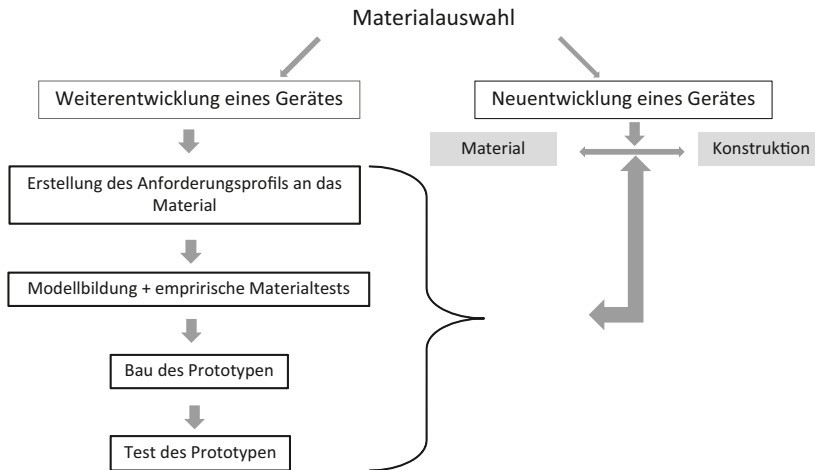
Sportarten	Thermo- regulierend	Kompr.- unterstütz.	Biomech. Unterstützung	Schutz- funktionen	Regelwerk
Badminton	+	+	–	–	IBV
Baseball	+	+	–	+	DBSV
Basketball	+	+	–	–	FIVB
Bogenschießen	+	+	+	+	DSB
Boxen	+	+	–	+	WBF
Fechten	+	+	+	+	DFB
Feldhockey	+	+	–	+	DHB
Fußball	+	+	–	–	FIFA
Gewichtheben	+	+	+	+	–
Handball	+	+	–	–	IHF
Judo	+	+	–	–	DJV
Kanu	+	+	+	–	DKV
Leichtathletik	+	+	+	–	IAAF
Mod. Fünfkampf	+	+	+	+	IAAF
Radsport	+	+	+	+	BDR
Reiten	+	+	–	+	DRV
Ringen	+	+	–	–	DRB
Rudern	+	+	+	–	IRF
Schießen	+	+	–	+	–
Schwimmen	+	+	+	–	DSV
Segeln	+	+	–	–	–
Softball	+	+	–	–	–
Synchronschwimmen	+	+	+	–	DSV
Taekwondo	+	+	+	+	
Tennis	+	+	–	–	ITF
Tischtennis	+	+	–	–	ITTF
Triathlon	+	+	+	+	DTU
Turnen	+	+	–	–	FIG
Volleyball	+	+	–	–	FIVB
Wasserball	+	+	–	+	DSV
Wasserspringen	+	–	–	–	DSV

verglichen. Beim Handlaminieren muss bemerkt werden, dass das Produkt nie vollständig reproduzierbar ist. So kann es zu Lufteinschlüssen kommen, die die Stabilität und die Steifigkeit negativ beeinflussen. Demgegenüber kann das Vakuumverfahren diese Lufteinschlüsse vermeiden oder bereits eingeschlossene Luft wieder absaugen. Auch überschüssiges Harz kann aus den oberen Lagen abgeleitet werden. Beim Harzinjektionsverfahren tritt dieses Problem nicht auf, da das Harz durch die Kapillaren des zusammengedrückten Gewebes die Luftblasen zu den Absaugpunkten drückt. Trotz der Nachteile des Hand-

**Tab. 5.4** Wintersportarten und ihre Anforderungen an die Bekleidung

Sportarten	Thermo- regulierend	kompr.- unterstütz.	Biomech. Unterstützung	Schutz- funktionen	Regelwerk
Ski Alpin	+	+	+	+	FIS
Langlauf	+	+	+	+	FIS
Skispringen	+	+	+	+	FIS
Nord. Kombination	+	+	+	+	FIS
Ski Freestyle	+	+	+	+	FIS
Snowboard	+	+	+	+	FIS
Biathlon	+	+	+	+	FIS
Eiskunstlauf	+	+	+	–	DEU
Eisschnelllauf	+	+	+	–	DEU
Shorttrack	+	+	+	+	DEU
Bob	+	+	+	+	Federation Internationale de Bobsleigh et de Tobagan- ning; Skeleton Rules 2002
Skeleton	+	+	+	+	Federation Internationale de Bobsleigh et de Tobagan- ning; Skeleton Rules 2002
Rodeln	+	+	+	+	Internatio- nal Luge Federation: International Luge Regula- tions Artificial Track 2002 Edition
Eishockey	+	+	+	+	IIHF
Curling	+	+	+	–	WCF

laminierens wird dieses Verfahren weiter verwendet, da es die geringsten Produktionskosten verursacht. Zusätzliche Vakuumtechnik bedeutet auch zusätzliche technologische Innovationskosten.



**Abb. 5.16** Konzept zur Wahl eines Materials für Sportgeräte

### Schlussfolgerungen für die Wahl von Materialien bei Sportgeräten

Wie die vorangestellten Beispiele belegen, werden zunehmend Faserverbundwerkstoffe für die Herstellung von Sportgeräten verwendet. Diese haben den Vorteil, dass einzelne Eigenschaften bspw. durch die Veränderung der einzelnen Komponenten variiert und damit optimiert werden können. Die Wahl des Materials beeinflusst entsprechend dem Schaubild in Abb. 5.16 den gesamten Entwicklungs- bzw. Optimierungsprozess des Produktes. Jedoch ist zunächst zu entscheiden ob es sich um ein vollständig neu zu entwickelndes oder ein zu optimierendes Gerät handelt. Bei der Neuentwicklung eines Gerätes kommt hinzu, dass die Materialwahl stark von der Konstruktionsweise abhängt. Da diese bei einem neuen Gerät nicht von vornherein festliegt, sind im gesamten Prozess diese Wechselwirkungen zu beachten.

Beispiele für moderne Materialien sind insbesondere auch bei den Sporttextilien zu finden. Diese sollen folgende Eigenschaften möglichst optimal erfüllen:

- Passform (z. B.: enganliegend und trotzdem hohe und bleibende Elastizität),
- UV-Schutz,
- Winddichte,
- Wasserdichte,
- Atmungsaktivität,
- Antistatik,
- Pflegeleichtigkeit,
- Kombinationsfähigkeit mit anderen Textilien,
- Biomechanische Unterstützung der Bewegung.

In Abhängigkeit von der Sportart werden unterschiedliche Anforderungen an die Bekleidung gestellt. Diese sind in den Tab. 5.3 und 5.4 zusammengestellt.

---

### 5.3 Nutzung moderner Technologien – dargestellt am Beispiel der Nanotechnologie

Bei der Erstellung des Konzeptes bzw. des Baus des Prototypen eines neuen Sportgeräts sollten auch stets Möglichkeiten moderner Technologien berücksichtigt werden. Das bedeutet einerseits die Offenheit gegenüber modernen Technologien, aber andererseits auch eine kritische Herangehensweise. Dazu müssen einige Gesichtspunkte beachtet werden.

In diesem Abschnitt geht es darum, am Beispiel der Nanotechnologie die Vorgehensweise für die Entscheidungsfindung einer möglichen Einbeziehung neuer Technologien in den Produktentwicklungsprozess darzustellen. Die Ausführungen basieren auf umfangreichen Recherchen und Untersuchungen der Anwendbarkeit der Nanotechnologie auf die Entwicklung und Optimierung von Sportgeräten (Witte et al. 2008).

#### 5.3.1 Bedeutung der Nanotechnologie

Der Begriff Nanotechnologie umfasst folgende Aspekte (Paschen 2004):

- Strukturen, die in mindestens einer Dimension kleiner als 100 nm sind,
- charakteristische Effekte und Phänomene, die im Übergangsbereich zwischen atomarer und mesoskopischer Ebene auftreten und
- gezielte Herstellung und/oder Manipulation einzelner Nanostrukturen.

Das Besondere an nanotechnologischen Strukturen ist, dass die Eigenschaften der Einzelteilchen und deren Wechselwirkungen untereinander relevanter sind als die Eigenschaften des Materials selbst. Das bei Nanomaterialien charakteristische große Verhältnis von Oberfläche bzw. Grenzfläche zum Volumen kann dazu führen, dass bei zunehmendem Oberflächenanteil die Oberflächenenergie der Teilchen ansteigt und sich so die Eigenschaften des eigentlichen Materials drastisch ändern. Diese Eigenschaften sind bspw.: Superplastizität, erhöhte Bruchzähigkeit und -festigkeit, verbesserte weichmagnetische Eigenschaften, veränderte Wärmeleitfähigkeit und veränderter elektrischer Widerstand.

Auf der Grundlage dessen, dass den geometrischen Arrangements der atomaren bzw. molekularen Bausteine große Bedeutung zukommt, lassen sich einzelne Basisstrukturen unterscheiden: „punktförmige“ Strukturen, deren Ausmaß in allen drei Dimensionen kleiner als 100 nm ist (z. B.: Nanokristalle, Cluster oder Moleküle), linienförmige Strukturen, welche in zwei Dimensionen nanoskaliert sind (z. B.: Nanodrähte, Nanoröhren, Nanostäbe und Nanogräben) und Schichtstrukturen, die nur in einer Dimension nanoskaliert

sind (Paschen 2004). Weiterhin können Poren sowie komplexe Strukturen (supramolekulare Einheiten oder Dendrimere) unterschieden werden. Dabei sind unter mechanischem Gesichtspunkt besonders die Kohlenstoff-Nanoröhren hervorzuheben. Diese können auf Grund ihrer hohen Zugfestigkeit und Stabilität bspw. als ideale Fasern für Polymerverbundwerkstoffe angesehen werden. Sie bieten die Möglichkeit der Herstellung harter, verschleißarmer Schutzschichten. Damit ergibt sich als ein auch für die Sportartikelhersteller relevantes Anwendungsgebiet zur Verbesserung der mechanischen und tribologischen Eigenschaften von Oberflächen. Damit ist es bspw. möglich, mechanische Schutzschichten aus nanostrukturierten Oxiden (z. B.: Siliziumoxid) auf weiche, flexible Materialien (Holz, Papier, Textilien, Polymere oder leichte Metalle) aufzubringen. Nanoskalierte Polymerschichten können entsprechend ihrer tribologischen Eigenschaften als Gleitbeschichtung oder Antihafbeschichtung eingesetzt werden. Aber auch die Bruchfestigkeit kann durch gezieltes mehrschichtiges Auftragen erhöht werden.

Es ist also festzuhalten, dass sich fundamentale physikalische und chemische Eigenschaften ändern, wenn eine kritische Größe des Ausgangsmaterials von etwa 100 nm unterschritten wird. Wenn es um Grenzflächenoptimierung geht, finden sich in der Bionik oft viele Ideen und Anwendungsmöglichkeiten. Eine dieser möglichen Anwendungen könnte die Herstellung sehr glatter Oberflächenschichten sein, unter der Voraussetzung, dass sich der Strömungswiderstand dadurch verringern lässt. Auf Grund des Verhältnisses der im Sport auftretenden Geschwindigkeiten und der Oberflächenrauigkeit sind durch eine „extreme Glätte“ jedoch keine Effekte zu erwarten (vgl. Witte et al. 2008).

Allerdings ist bekannt, dass hydrophile und hydrophobe Eigenschaften die Strömungsverhältnisse beeinflussen. Bei Kontakt einer Flüssigkeit mit der Oberfläche eines festen Körpers entsteht ein bestimmter Kontaktwinkel. Die Größe des Kontaktwinkels wird vom Kräftegleichgewicht zwischen gasförmigem, flüssigem und festem Körper beeinflusst. Ist der Kontaktwinkel kleiner als  $90^\circ$ , ist die Flüssigkeit benetzend und man spricht von einem hydrophilen Verhalten (z. B.: Luft/Wasser/Glas). Bei Kontaktwinkeln oberhalb von  $90^\circ$  verhält sich die Grenzfläche dagegen hydrophob (z. B.: Luft/Wasser/Teflon). Hydrophobe Eigenschaften von Grenzflächen (oft auch Lotus-Effekt genannt) haben unter anderem den Effekt, sich schmutzabweisend zu verhalten. Durch das verringerte Anhaften der Flüssigkeitsteilchen an der festen Oberfläche wird aber auch der Strömungswiderstand verringert. Das bedeutet also, dass durch hydrophobe Eigenschaften von Grenzflächen die Benetzung von Sportgeräten mit Wasser stark reduziert werden kann. Soll dagegen eine gleichmäßige Wasserschicht auf der Oberfläche erreicht werden, muss diese hydrophil sein.

Eine weitere Möglichkeit der Verringerung des Strömungswiderstandes, die der Bionik entlehnt ist, stellt die sogenannte Haifischhaut dar. Durch die kleinen Längsrillen auf den Schuppen wird der Strömungswiderstand verringert, indem die Querströmung gesenkt und die Wandreibung reduziert wird. Anwendung findet dies bereits bei Flugzeugen.

### 5.3.2 Technologische Grundlagen

Bezüglich der Technologien für die Nanostrukturierung von Oberflächen kann grundsätzlich in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- Beschichtungsverfahren, bei denen zusätzliches Material auf die Oberfläche aufgetragen wird und
- Oberflächenbehandlungsverfahren, die zu einer Veränderung der Oberflächenzone ohne Schichtabscheidung führen.

Bei nanotechnologischen Beschichtungsverfahren können zwei Herangehensweisen unterschieden werden: Einerseits können gezielt bereits vorhandene Nanopartikel in Beschichtungen eingebaut werden, andererseits werden während der Beschichtung Mikro- und Nanostrukturen formiert (Baer et al. 2003).

Zu den wichtigsten physikalischen Vakuumbeschichtungsverfahren, die zur Herstellung von nanostrukturierten Beschichtungen im industriellen Maßstab eingesetzt werden können, zählen:

- Kathodenzerstäubung/Sputtern (PVD [Physikalische Gasphasenabscheidung]),
- Vakuumlichtbogenverdampfung/Arc-PVD (PVD),
- Elektronenstrahlverdampfung (PVD),
- Sputtern und Bedampfen in reaktiver Gasphase (PCVD),
- Ionenstrahlassistierte Beschichtung (IBAD: Kombination von PVD und Ionenbehandlung).

Kritisch muss allerdings angemerkt werden, dass mit diesen Vakuumbeschichtungsverfahren nur relativ kleine Bauteile mit geringem Aufwand beschichtet werden können. Bei Vakuumbeschichtungen größerer Teile, wie es bei Sportgeräten meist der Fall ist, sind umfangreichere gerätetechnische Aufwendungen zu kalkulieren.

Die Sol-Gel-Beschichtung und die metallorganische Abscheidung (MOD) zählen zu den wichtigsten chemischen Schichtabscheidungsverfahren, die für die Erzeugung von Nanostrukturen verwendet werden. Weitere Beschichtungsmöglichkeiten sind:

- Beschichtungen basierend auf der Kolloidchemie (Nanopartikeldispersionen),
- Plasma-Spray-Beschichtung mit Nanopartikeln,
- Ionenbehandlung,
- Kombinierte Lithographie-Beschichtungsverfahren.

Detailliertere Erläuterungen sind der weiterführenden Literatur zu entnehmen (Barsan und Aldea 2010; Bhushan 2011; Binns 2010).

### 5.3.3 Mögliche nanotechnologische Anwendungen im Sport

Grundsätzlich kann angenommen werden, dass durch spezifische Beschichtungsverfahren und Oberflächenstrukturierungen die gewünschten Eigenschaften modifiziert werden können. Dabei sollen folgende Effekte bzw. Beeinflussungen erzielt werden:

- Verschleißschutz,
- Korrosionsschutz,
- Reibung (insbesondere zwischen Festkörpern),
- hydrophile bzw. hydrophobe Eigenschaften,
- mechanische Belastung trotz verringerter Materialmasse,
- sonstige Grenzflächenwechselwirkungen.

Der *Tennisschläger* ist ein gutes Beispiel, um evtl. Anwendungsmöglichkeiten darzustellen. Durch die vielfältigen Möglichkeiten der Nanotechnologie können Oberflächenveredlungen und Feinstrukturierungen an den Saiten und am Schlägerrahmen vorgenommen werden. So ist es vorstellbar, die gute Schockabsorption der Naturdarmsaiten mit Hilfe von Nanohohlräumen und -kanälen nachzubilden (Flory und Escoubas 2004). Auch der Reibungskoeffizient, welcher die Spineigenschaften beeinflusst, kann nanotechnologisch modifiziert werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass im Schläger selbst durch nanotechnologisch verbesserte Faserverbundwerkstoffe schockdämpfende Komponenten integriert werden.

Die Verringerung des Reibungskoeffizienten und des Verschleißes (Palermo und Jones 2004) ist auch im *Radsport* von großer Bedeutung. Dies betrifft bspw. das Lager. Neue nanotechnologische Beschichtungen insbesondere auf der Grundlage von metallhaltigen Kohlenstoffschichten aber auch nanokristallinen und nanokompositischen keramischen Verschleißschutzschichten sind hierfür vielversprechende Möglichkeiten. Insbesondere nanokompositische keramische Verschleißschutzschichten weisen aufgrund ihrer feineren Struktur höhere Härten und damit einen höheren Widerstand gegen Abrasivverschleiß auf. Der Schutz vor Korrosion ist gerade dadurch gegeben, dass die dichter gepackten Schichtbestandteile von Nanokompositbeschichtungen eine geringere Durchlässigkeit für korrosionsfördernde Stoffe (Sauerstoff, Wasser, Kohlenwasserstoffe) bewirken.

Aber auch durch nanostrukturierten Metalleinbau in eine polymerartige Matrix werden die amorphen Kohlenstoff-Beschichtungen widerstandsfähiger gegen mechanische Wechselbelastungen und Korrosion. Auf der Basis des breiten Spektrums der kohlenstoffbasierten Nanomaterialien können nanopartikelgefüllte Polymerbauteile (Rahmen, Gabel, Felgen...) erzeugt werden, wodurch das Verhältnis zwischen Masse und den mechanischen Belastungsparametern weiter optimiert werden kann. Generell ist davon auszugehen, dass leichte und meist daraus resultierend weichere Konstruktionsmaterialien einer hochwertigeren Oberflächenbeschichtung bedürfen. Spezielle nanotechnologische Beschichtungsverfahren bieten oft auch den Vorteil, thermisch sensible Materialien bspw. als Matrixmaterial einsetzen zu können.

Nanobeschichtungen sind auch bei vielen Ausrüstungsgegenständen (z. B. Bekleidung) denkbar, wenn es darum geht, die Hydrophobizität zu erhöhen. Dies ist bei Schwimmbekleidungen, Schutzbrillen, Bootskörpern und Segeln denkbar. Gleichzeitig muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass in Bezug auf den Leistungssport das gültige Reglement zu beachten ist.

Auch für **Wurfgeräte** in der Leichtathletik ist der Einsatz nanotechnologischer Verfahren grundsätzlich möglich. Hier steht die Verbesserung von Korrosions- und Verschleiß-eigenschaften (bspw. beim Auftreffen auf hartem Untergrund und der dadurch resultierenden Änderung der aerodynamischen Eigenschaften) im Vordergrund. Für diese Disziplinen ist jedoch zu bemerken, dass entsprechend der Wettkampfregelein, die Geräte allen Athleten zur Verfügung stehen. Deshalb ist für den einzelnen Sportler lediglich die Kenntnis von Vor- oder Nachteilen eines bestimmten Fabrikats bzw. die Auswahl des Gerätetyps, welcher auch beim Training verwendet wird, von Vorteil. Eine mögliche Veränderung der Flugeigenschaften durch Variation der Oberflächenstrukturierung sollte jedoch immer mit empirischer Überprüfung einhergehen, um ein sinnvolles Verhältnis zwischen technologischem Aufwand und Flugweite zu erzielen.

Die Verwendung kleiner Oberflächenstrukturierungen (z. B. durch das Aufbringen entsprechender Folien), die wiederum Verwirbelungen erzeugen, kann aerodynamisch günstig sein, wenn dadurch der Strömungswiderstand reduziert wird. Beispiele hierfür bietet die Bionik (vgl. Nachtigall 2002).

### 5.3.4 Darstellung ausgewählter Beispiele

Anhand der folgenden Beispiele in der Tab. 5.5 soll gezeigt werden, inwiefern nanotechnologische Verfahren eine Optimierung von Sportgeräten ermöglichen würden.

Besteht das Ziel, die Oberfläche von Rennruderbooten zu optimieren, sind zwei Aspekte zu berücksichtigen. Einerseits ist zu prüfen, ob und mit welchen Mitteln eine Oberflächenveränderung realisiert werden kann und andererseits ob dies nicht gegen die Vorschriften der FISA (Fédération Internationale des Sociétés d'Avion, dt.: Ruderweltverband) verstößt.

Das Problem von konventionellen Beschichtungen bei Tennisschläger-Saiten besteht in der geringen Haltbarkeit. Deshalb wird den Naturdarm-Saiten weiterhin der Vorrang gegeben. Diesbezüglich wäre es denkbar, nanotechnologische Beschichtungsverfahren einzusetzen.

Auch am Beispiel des Bobs wird deutlich, wie stark das Regelwerk technologische Verbesserungen einschränkt. Würde man bspw. die Oberfläche nanotechnologisch veredeln, hätte dies keinen Effekt bei offiziellen Wettkämpfen, da das Kufenmaterial vorgegeben ist. Bezüglich der Kufen kann also nur an der Geometrie durch Konstruktion optimiert werden (vgl. FES 2012).

Weitere Sportartikel aus den verschiedenen Disziplinen (Schwimmen, Segeln, Triathlon, Tischtennis, Radsport, Leichtathletik, Schlittensport, Skisport, Fechten) wurden unter



**Tab. 5.5** Beispiele für mögliche nanotechnologische Anwendungen bei Sportgeräten

Sportart Sportgerät	Spezielle Eigenschaften	Nanotechnologische Lösungsansätze	Regelwerk
Rudern Rennruderboot	Gesamtwiderstand wird im Wesentlichen vom Wasserwiderstand und dieser u. a. vom Reibungswiderstand beeinflusst	Schleimabsonderung	Verfügbarkeit für alle, Chancengleichheit
		Behaarung	Nicht zu hohe Kosten für Innovationen
		Dämpfungshaut	Keine Umweltschädlichkeit
		Spezielle Schuppenstruktur	Keine Substanzen und Strukturen, die die Eigenschaften der Grenzschicht beeinflussen (FISA Rule Book 2011)
Tennisschläger Tennis	Reibungseffekt zwischen Saiten und Ball ist optimal bei $>0,3$ (Cross 2000)	Strukturierung der Saiten Verbesserung des Top-Spin-Effektes	Identische Spieleigenschaften des Schlägers auf beiden Seiten Es dürfen nur Objekte/Vorsprünge befestigt sein, die Verschleiß bzw. Vibrationen verhindern
Bob	Reibung zwischen Kufen und Eis	Nanostrukturierung des Stahls mit Chrom, Titan, Wolfram,... zur Erzeugung einer hohen Härte	Kufe muss aus einem massiven homogenen Stück Stahl (konstante chemische Zusammensetzung) bestehen
		Pulvermetallurgische Technologien zum Beimischen von Nanopartikeln für die Verbesserung der Gleiteigenschaften	Keine Beschichtung und aerodynamische Kufenverkleidung Kein Aufheizen der Kufen
			Das Kufenmaterial wird vom Weltverband geliefert

dem Aspekt der Anwendung nanotechnologischer Verfahren von Witte et al. (2008) aufgearbeitet. Auf der Basis eigener empirischer Untersuchungen konnten Lösungsvorschläge für die Beschlagsreduzierung optischer Ausrüstungsgegenstände und deren Tests erarbeitet werden (Witte et al. 2008).

### 5.3.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass moderne Technologien es möglich machen, Produkte hinsichtlich bestimmter Eigenschaften zu verbessern. Dies trifft natürlich auch für Sportartikel zu. In jedem Fall ist die Sinnhaftigkeit ihrer Nutzung zu prüfen. Werden moderne Technologien zur Optimierung der Eigenschaften eingesetzt, die maßgeblich Einfluss auf die sportliche Leistung oder auch auf die Gesundheit des Sportlers haben kön-

nen, sind entsprechende Richtlinien und Gesetze zu beachten. Im Bereich des Sports betrifft dies insbesondere die jeweiligen Regelwerke. Hier hat es sich gezeigt, dass bei sehr vielen Geräten bzw. Ausrüstungen eine starke Reglementierung besteht und sich diese auch im Laufe der Zeit ändert. Prinzipiell gilt der Grundsatz, dass mit bestimmten Maßnahmen Eigenschaften verändert werden können, so lange bis diese messbar sind und auf Grund der Chancengleichheit aller Wettkampfteilnehmer ein entsprechendes Verbot im Reglement ausgesprochen wird. Ein Beispiel hierfür ist die Schwimmbekleidung (FINA 2010). Demnach sind bestimmte Ribletstrukturen und Ganzkörperanzüge, die den Schwimmern einen nachgewiesenen Vorteil bieten, nicht mehr zulässig.

Andererseits kann die Anwendung moderner Technologien auch einen verbesserten Schutz der Athleten bedeuten. So können bestimmte Antibeschlagmittel bei ihrer Anwendung auf Helmvisieren die Sicht des Sportlers und damit seine Sicherheit deutlich verbessern.

---

## 5.4 Modellbildung

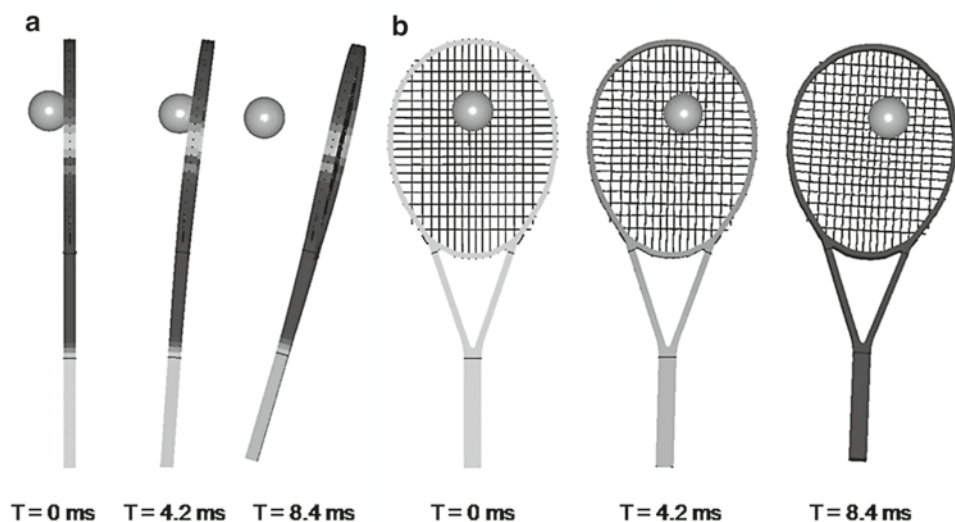
Für die Erstellung des Konzepts bzw. der Erstellung des Prototyps eines Sportgerätes wird immer mehr die Modellmethode verwendet. Diese bezieht sich zum einen ausschließlich auf das Gerät und zum anderen auf die Wechselwirkung zwischen Gerät und dem Sportler als auch auf den Sportler selbst. Nachfolgend soll auf diese Aspekte eingegangen werden.

Die Modellierung eines Tennisschlägers kann bspw. als Grundlage für eine Optimierung weiterführender Untersuchungen zur Belastungsanalyse im Tennissport gesehen werden. Im Mittelpunkt einer Studie (Jackstien und Witte 2008) stand die Simulation des Schwingungsverhaltens eines Schlägers. Dabei wurde das Schlägermodell zunächst als CAD-Modell mit den entsprechend der Regeln der ITF (International Tennis Federation) geforderten Abmessungen und Gewicht als starres und flexibles Modell mit MSC Adams erstellt (vgl. Abb. 5.17). Mit Hilfe einer High-Speed-Bewegungsanalyse (Aufnahmefrequenz: 924 Hz) wurden das Schwingungsverhalten des Tennisschlägers sowie das Rücksprungsverhalten empirisch erfasst. Der Vergleich der Ergebnisse der Simulation mit empirischen Untersuchungen (Falltest) zeigte, dass das Modell eingesetzt werden kann (max. Fehler: 11 %).

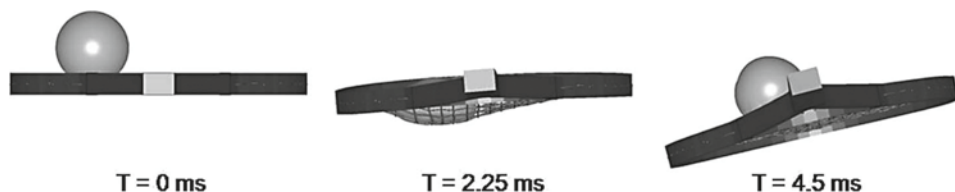
**Finite-Elemente(FE)-Modelle** In vielen Bereichen der Sportgerätekonstruktion und der Biomechanik wird die Finite-Elemente-Methode eingesetzt (Huber et al. 2009). Insbesondere wird sie dort verwendet, wo es um Spannungs- und Festigkeitsanalysen geht. Aufgrund der Komplexität heutiger Materialien bzw. der Notwendigkeit von Kontaktsimulationen scheint die FE-Methode besonders dann interessant, wenn es um die Wechselwirkung zwischen Sportler und Sportgerät geht.

Auch mit Hilfe einfacher also nicht allzu komplexer Modelle ist es möglich, relevante Eigenschaften eines Sportgerätes zu ermitteln. So bestimmten Runciman et al. (2011) das Resonanzverhalten von Kanu-Paddeln unterschiedlichen Designs mit einem einfachen FE-Modell auf der Basis des CAD/CAM-Systems NX 7.5. Eine empirische Überprüfung





**Abb. 5.18** Sequenzen des FE-Modells für die Rotation um die transversale Achse (a) und die Normal-Achse (b) vor, während und nach dem Auftreffen. (Quelle: Alan et al. 2010b)

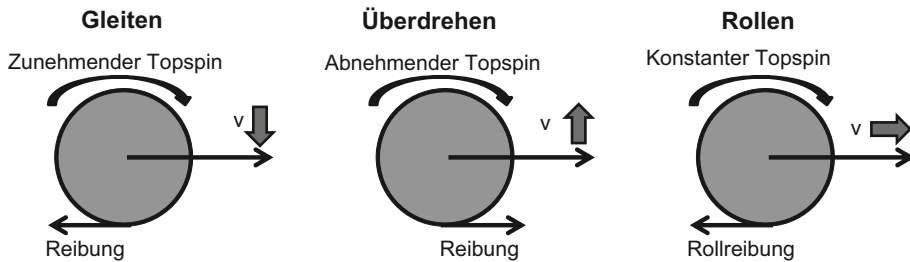


**Abb. 5.19** Sequenzen des FE-Modells für die Rotation um die Längs-Achse während des Auftreffens. (Quelle: Alan et al. 2010b)

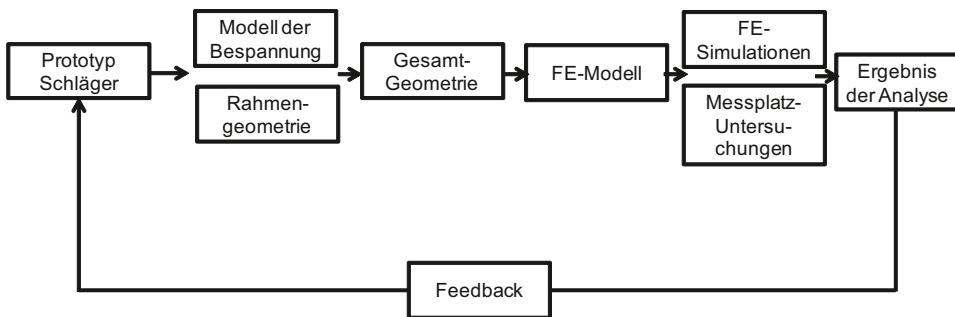
konnte bspw. gezeigt werden, dass der Topspin abhängig vom Reibungskoeffizienten ist. In Abhängigkeit von der Reibung, dem Auftreffwinkel und der Geschwindigkeit ergeben sich die in der Abb. 5.20 dargestellten Zustände für die Geschwindigkeit des Tennisballs nach dem Auftreffen.

Für die Erstellung und Validierung eines FE-Modells kann, wie es das Beispiel für den Tennisschläger zeigt, entsprechend dem Flussdiagramm in Abb. 5.21 generell vorgegangen werden.

**Biomechanische Mehrkörpermodelle** Es wird davon ausgegangen, dass mit Hilfe von biomechanischen Mehrkörpermodellen auch Wechselwirkungen zwischen Sportler und Gerät bestimmt und simuliert werden können. Wie die Recherche zeigt, sind in der Literatur nicht allzu viele Beispiele hierzu zu finden. Dies resultiert insbesondere daraus, dass eine biomechanische Modellbildung, die den passiven wie den aktiven Bewegungsapparat umfasst, sehr komplex ist. Aus diesem Grund wird oft versucht, relativ einfache Modelle zu



**Abb. 5.20** Die drei Zustände nach dem Auftreffen eines Tennisballs auf den Schläger. (Mod. nach Alan et al. 2010a)



**Abb. 5.21** Flussdiagramm zur Erstellung und Validierung eines FE-Modells für ein Sportgerät, dargestellt am Beispiel des Tennisschlägers. (Mod. nach Allan et al. 2010c)

verwenden. So ist von Glitsch (2001) ein starres Mehrkörpermodell bekannt, das aus zwei Unterschenkeln, 2 Skiern und einem Trapezmechanismus zur Beschränkung des maximalen Aufkantwinkels besteht. Durch den Vergleich mit realistischen Bodenreaktionskräften konnte die Validität des Modells belegt werden. Hiermit besteht die Möglichkeit der Veränderung von Materialeigenschaften und der Geometrie der Skier, um deren Einfluss auf das Fahrverhalten zu untersuchen.

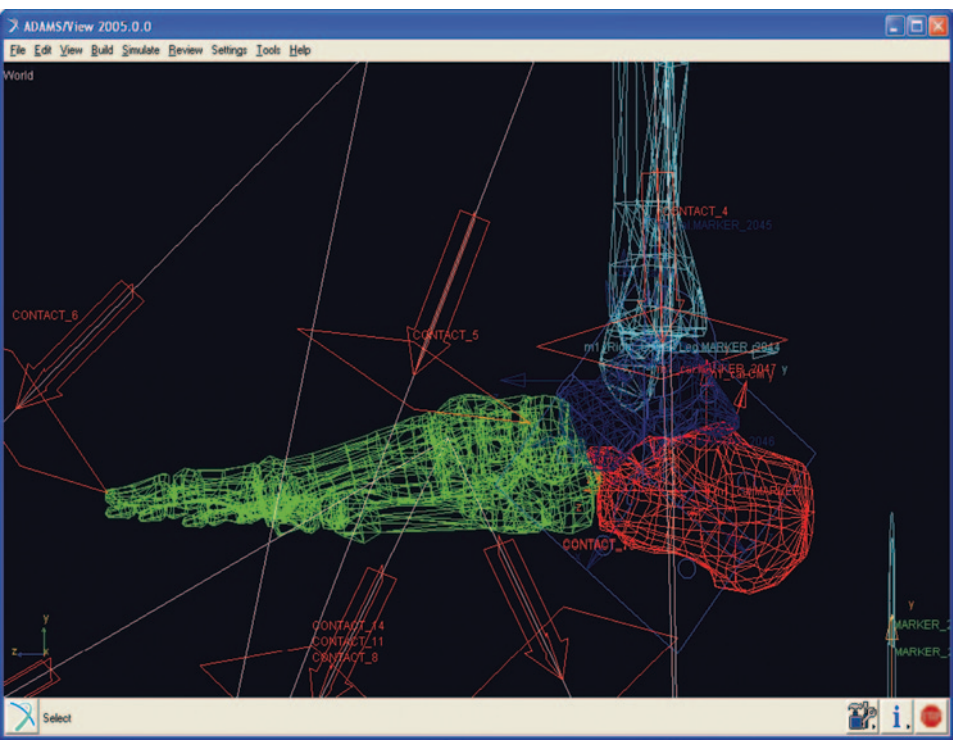
Wie auch in anderen Wissenschaften und Disziplinen (Naturwissenschaften, Ingenieurwissenschaften, Medizin) findet die Computersimulation in der Sportwissenschaft (speziell in der Biomechanik und Sporttechnologie) zunehmend Verwendung. Die Tab. 5.6 zeigt einen Überblick über Simulationsprogramme von Mehrkörpersystemen (MKS), die auch zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch von Bedeutung sind.

Von Dänhardt et al. (2009) wurde mit Hilfe einer Mehrkörpersimulationsumgebung MSC.ADAMS/view ein Fuß mit den Teilsegmenten Calcaneus, Talus und Vorfuß modelliert (Abb. 5.22) mit dem Ziel, den Einfluss verschiedener Laufschuhe auf die Kinematik des oberen und des unteren Sprunggelenks zu bestimmen.

Aufgabe der Modellierung war es herauszufinden, inwieweit unterschiedliche Lagen der Gelenksachsen der Sprunggelenke zueinander die Bewegung um die Gelenksachsen beeinflussen. Zur Simulation der unterschiedlichen Neigungen der Gelenksachsen und

**Tab. 5.6** Zusammenstellung von Programmen zur Simulation von Mehrkörpersystemen. (Mod. nach Senner et al. 2004)

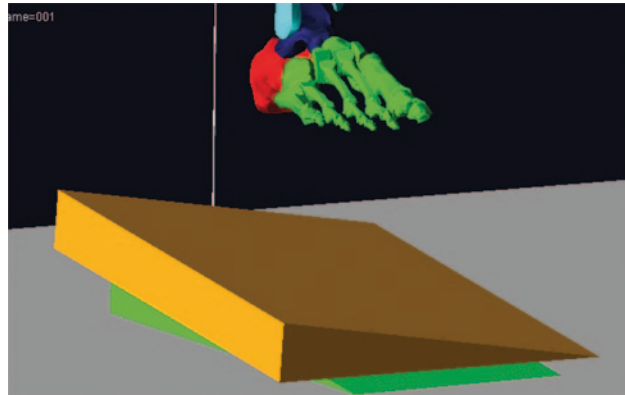
Programmname	Hersteller/Vertreiber
ADAMS™ mit LifMod	Mechanical Dynamics Inc., Ann Arbor, Michigan USA
Alaska mit Dynamicus	Institut für Mechatronik, TU Chemnitz, Deutschland
DADS	Fa. CADSI, Coralville, Iowa, USA
FT-Arup	First Technology Safety Systems Inc., Plymouth, Michigan, USA
MADYMO	Fa. Cray Research, Eagan, Minnesota, USA
PromMECHANICA	Parametric Technology Corp., Waltham, Massachusetts, USA
SIMPACK	Intec, Oberpfaffenhofen, Deutschland



**Abb. 5.22** Modellierung eines Fußes mit MSC Adams. (Quelle: Dänhardt et al. 2009)

des Auftreffens des Fußes auf einen Untergrund wurde die Anordnung der beiden schrägen Ebenen, auf die der Fuß aus einer definierten Höhe fällt, entsprechend der Abb. 5.23 verwendet. Vernachlässigt wurde die Einbeziehung der Muskulatur als Feder-Dämpfer-Element bzw. deren propriozeptiven Reize. Die Überprüfung des Modells fand mit einem mechanischen Prüfstand statt. Als Ergebnis der Modellierung konnten für verschiedene

**Abb. 5.23** Modellierung des Auftreffens eines Fußes auf einen Untergrund. Die schiefen Ebenen simulieren die unterschiedlichen Lagen der Gelenksachsen zueinander. (Quelle: Dänhardt 2005)



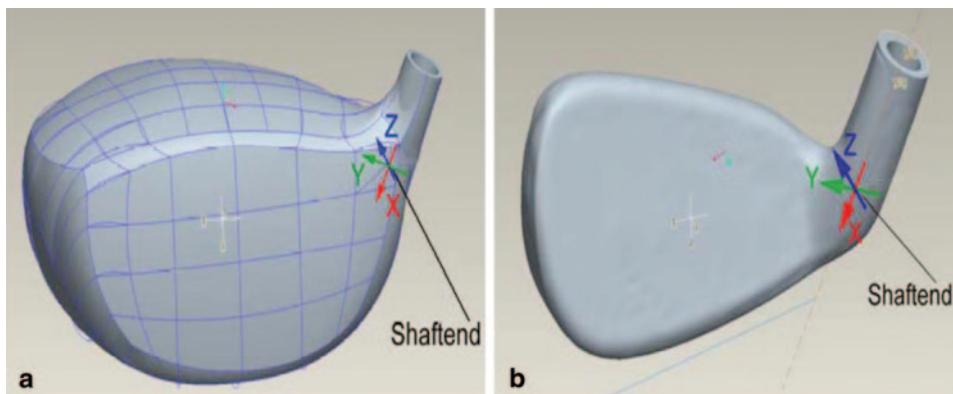
Experimentalanordnungen die Winkelgeschwindigkeiten um die untere und obere Sprunggelenksachse ermittelt werden. Dabei zeigte es sich, dass eine kleine Änderung der Lage der Gelenksachsen zueinander schon einen entscheidenden Einfluss auf die kinematischen Bewegungsparameter in den Sprunggelenken nimmt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen könnte nun versucht werden, auch den Einfluss der verschiedenen Schuhfersen-Geometrien des Laufschuhs mit einzubeziehen, indem das Modell derart erweitert wird, dass auch die Modellierung des Schuhs und die Wechselwirkung mit dem Fuß integriert werden.

Als Beispiele für die Anwendung der Computersimulationen in der Sportgeräteentwicklung werden von Senner et al. (2004) die Skischuh- und Skibindungsentwicklung beschrieben und diskutiert. Dabei war es Aufgabe des Skischuhmodells, Sprung- und Landebewegungen zu simulieren und dabei die auftretenden Zugkräfte im Vorderen Kreuzband zu berechnen. Hierbei wird der enorme experimentelle Aufwand besonders deutlich, da für die Parametrisierung des Modells Bewegungsanalysen, Kernspinaufnahmen, Aufnahmen der Computertomographie und die Bestimmung der mechanischen und geometrischen Eigenschaften des Schaftmaterials notwendig sind. Bei der Skibindungsentwicklung steht man vor ähnlichen Problemen. Hier war es von besonderem Interesse, die Wirkungsweise des Knies zu simulieren. Ein Lastsimulator für das Skifahrerknie entwickelten Senner et al. (2004). Akzeptable Ergebnisse wurden für den Vergleich zwischen einem Kurzcarver und einem konventionellen Ski erzielt.

Ein weiteres Beispiel ist das Modell für das Handbiking, welches von Böhm et al. (2006) entwickelt wurde. Die Notwendigkeit hierfür wird darin gesehen, dass bisherige Ansätze zum Handbiking auf Konzepten des Fahrradfahrens basieren. Für das Handbiking sind aber die Bewegungen des Oberkörpers von besonderer Bedeutung. Von Böhm et al. (2006) wurde ein Muskel-Skelett-Modell für den Arm entwickelt, wobei die Lage der Muskeln mit Hilfe von Ultraschall-Aufnahmen bestimmt wurde. Die Ermittlung der Muskelaktivität erfolgte für verschiedene Sitzpositionen. Damit ist es möglich, durch eine optimale Sitzposition die Muskulatur effektiv zu trainieren und die Gelenkbelastung möglichst zu minimieren.

Ein weiteres Beispiel für die Wechselwirkung zwischen Sportler und Gerät stellt das dreidimensionale Modell eines Golfers mit Golfschläger dar (Betzler et al. 2006a, b). Damit ist es möglich, Rückschlüsse auf die während des Golfschwungs im Körper auftretenden





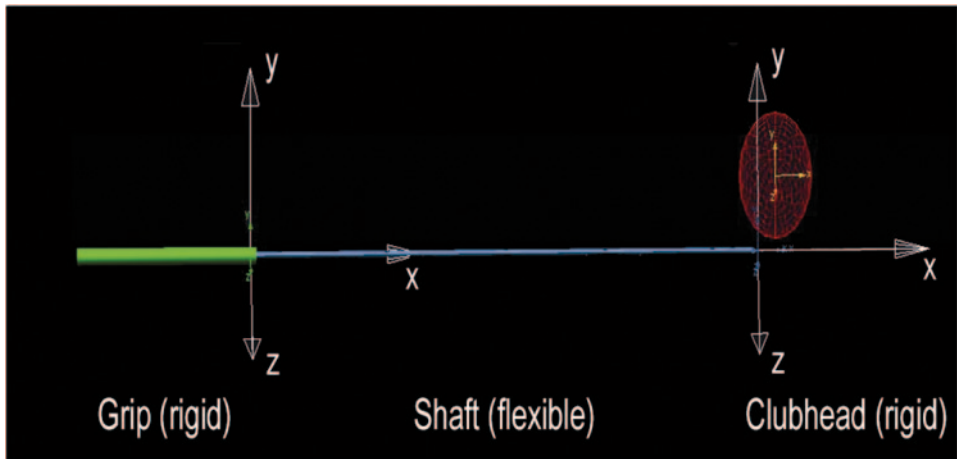
**Abb. 5.24** CAD- Modelle für Driver (a) und Iron (b). (Quelle: Betzler et al. 2007b)

Kräfte und Drehmomente zu ziehen. Das 18-segmentige Körpermodell (Mehrkörpersimulations-Software ADAMS(MSC Inc.) mit dem Plug-in „LifeMOD“ (BRG Inc.)) entstand auf der Grundlage einer dreidimensionalen Kinemetrie (VICON-System) sowie der Bestimmung der Bodenreaktionskräfte mit Kistler-Plattformen. Kritisch muss das Fehlen des Balles angemerkt werden. Somit konnte die Impulsübertragung des Schlägers auf den Ball nicht berücksichtigt werden. Daraus resultierten mitunter Probleme, die zu einem Gleichgewichtsverlust durch die im System verbleibende Energie führten.

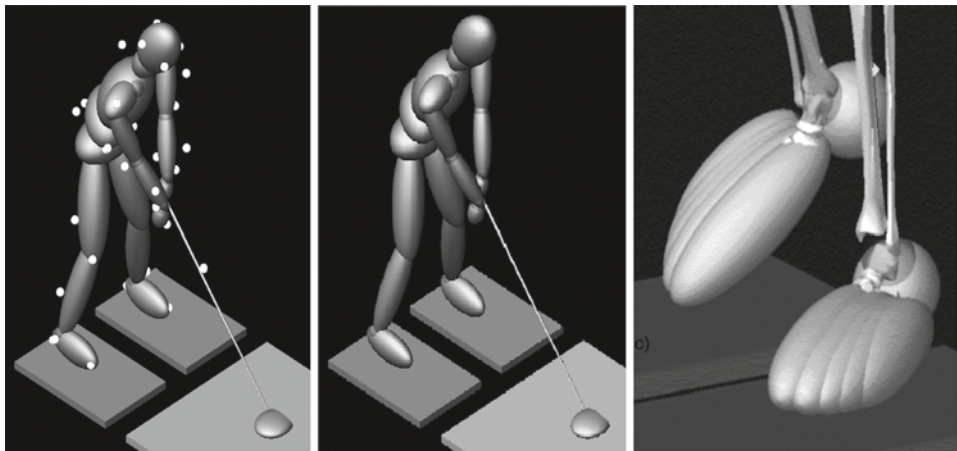
Die Modellierung des Sportgerätes basierte auf einem 3d-Scanning der realen Golfschläger, so dass CAD-Modelle entstanden (s. Abb. 5.24 und 5.25). Für den Schaft des Golfschlägers wurde ein Finite-Elemente-Modell erstellt (ANSYS), die Elastizität wurde mit einer 3-Punkt-Messung ermittelt. Dieses Modell wurde für zwei Driver (regulärer und steifer Schaft) sowie zwei Iron-Schläger (38" und 37¼") erstellt. Der Schlägerkopf war charakterisiert durch den Massenschwerpunkt des Kopfes und seinem Trägheitstensor. Für den Griff wurde ein einfacher Zylinder verwendet. Anschließend wurde das Schlägermodell mit dem 18-Segment-Menschmodell gekoppelt.

Für die Bestimmung der Bewegungs-Parameter wurde folgendermaßen vorgegangen. Mit Hilfe einer dreidimensionalen Kinemetrie (VICON-System mit 12 Kameras, 250 Hz) wurden die Golfschwünge analysiert (Betzler et al. 2006a). Mittels der Software ADAMS und dem Plug-Ins LifeMOD konnte eine Ganzkörper-Simulation des Schwunges auf der Basis der aufgenommenen kinemetrischen Daten erzeugt werden. Empirische und simulierte Daten zeigten im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung. Dies wurde durch den Vergleich der simulierten und empirisch bestimmten Bodenreaktionskräfte überprüft. Die Modellierungsschritte mit dem 18-segmentigen Körpermodell sind in der Abb. 5.26 dargestellt. Ein wesentliches Ergebnis der Modellierung besteht darin, dass Drehmomente in den Gelenken bestimmt werden konnten. Diesbezüglich ergab sich, dass sich bei Verwendung eines verlängerten Schafts das Drehmoment im linken Schultergelenk erhöht. Bei Veränderung der Steifigkeit des Schafts konnten keine Veränderungen von biomechanischen Kenngrößen festgestellt werden (Betzler et al. 2007c).





**Abb. 5.25** Komplettes Modell des Golfschlägers. (Quelle: Betzler et al. 2007a)



**Abb. 5.26** 18-segmentiges Körpermodell in der Modellierungsphase. *links*: Marker aus der Bewegungsanalyse sind aktiviert und steuern die Bewegung, *Mitte*: Marker sind deaktiviert und das Modell wird über die Gelenkmomente angetrieben, *rechts*: Verwendung von Ellipsoiden zur Definition der Bodenkontaktflächen zwischen Füßen und Kraftmessplatte. (Quelle: Betzler et al. 2007a)

Eine weitere Möglichkeit der biomechanischen Modellbildung unter Einbeziehung eines Sportgeräts besteht in der Nutzung der Mehrkörpersimulationsumgebung alaska<sup>6</sup> (v6.0, Institut für Mechatronik, TU Chemnitz) in Verbindung mit dem biomechanischen Menschmodell DYNAMICUS<sup>®</sup>. Hier verweist der Hersteller auf verschiedene Anwendungen: Eiskunstlauf, Simulation im Bobschlitten, Wurfbewegungen, Skisprung, Eisschnell-

<sup>6</sup> v6.0, Institut für Mechatronik, TU Chemnitz (<http://www.tu-chemnitz.de/ifm/produkte-html/alaskaDYNAMICUS.html>. Zugriff: 06.10.2012).

**Abb. 5.27** Bewegung des Kugelstoßers und gleichzeitige Verfolgung des Modells des Ganzkörperinertialmesssystems am Monitor.  
(Quelle: Ganter et al. 2011)



lauf, Startsprung im Schwimmen, Unfallbewertungen, Rehabilitation und Ergonomie sowie Belastungsanalysen des Bewegungsapparates.

Die Möglichkeiten dieser Software soll am Beispiel der reinen biomechanischen Analyse einer sportlichen Technik (s. nebenstehendes Beispiel) demonstriert werden.

#### **Biomechanische Analyse der Drehstoßtechnik beim Kugelstoßen mit dem Mehrkörpersimulationsprogramm Dynamicus in alaska (vgl. Ganter et al. 2011)**

Das Ziel bestand darin, diese Technik unter dem Aspekt des zeitlichen Verlaufs des Körper-Drehimpulses zu charakterisieren, da dieser biomechanische Parameter eine zentrale Bedeutung für Rotationstechniken hat (Hildebrand und Perl 2007). Die Bewegungsaufzeichnung erfolgte mit einem Ganzkörperinertialmesssystem IMS (MVN, Fa. Xsens Technologies, Niederlande<sup>7</sup>). Insbesondere wurde die Strap-Version zur Befestigung der Inertialmesssensoren am Körper verwendet, da sie eine bessere Bewegungsfreiheit der Sportler erlaubt als es bei Ganzkörperanzügen der Fall ist. Durch die kabellose Datenübertragung dieses Ganzkörperinertialmesssystems war es möglich, die Untersuchungen unter realen Bedingungen (Wurf-Stoß-Messplatz des IAT Leipzig) durchzuführen. Das Ganzkörperinertialmesssystem (IMS) besteht aus 17 Inertialmesssensoren (Beschleunigungsaufnehmer, Gyroskop und Magnetfeldsensor). Mit Hilfe des internen biomechanischen Modells (23 Segmente, 22 Gelenke) ist es möglich, die gewünschten kinematischen Parameter zu bestimmen. Das Modell selbst kann während der Bewegung synchron am Monitor verfolgt werden (vgl. Abb. 5.27).

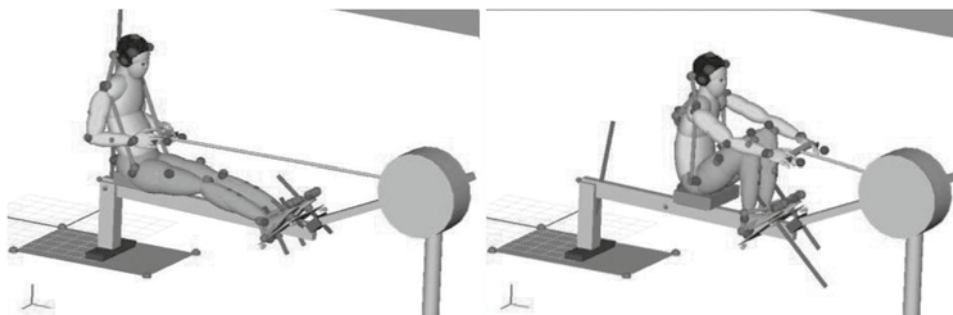
<sup>7</sup> Vgl. <http://www.xsens.com/en/movement-science/>. Zugriff: 06.10.2012.

**Abb. 5.28** Definitionen der Motion-Marker und der zugehörigen Body-Marker im Dynamicus Modell. Zu erkennen sind die teilweise vorhandenen Positionsunterschiede. Während des Modellierungsprozesses erfolgt eine Verknüpfung



Die gleichzeitige Messung der Bodenreaktionskräfte mit Hilfe von 3 Kraftmessplatten diente der Phaseneinteilung der Bewegung als auch der Überprüfung des Modells und seiner Fehlerabschätzung. Die Untersuchungen wurden mit einem männlichen Drehstoßer (B-Kader, 23 Jahre, 1,88 m, 125 kg) durchgeführt. Dabei wurden 6 Versuche (mit einer 8-kg-Kugel) analysiert und auf einer 5er Skala (1: „sehr gut“ ... 5: „sehr schlecht“) vom Sportler selbst bewertet. Die Bewegungsdaten aus dem IMS wurden über die Systemsoftware (MVN Studio v3.1) im c3d-Format exportiert und als „Motion Marker“ in die Software DYNAMICUS® importiert. Zusätzlich wurden sechs anthropometrische Parameter in das Modell mit einbezogen. Für die Erstellung des Modells ist es dann in einem weiteren Schritt notwendig, die „Motion Marker“ mit den „Body Markern“ im DYNAMICUS® zu verknüpfen (vgl. Abb. 5.28). Über die Inverse Kinematik werden Gelenkwinkel und -positionen angepasst und die gewünschten biomechanischen Größen (wie bspw. der Impuls) berechnet.

Während mit diesem Modell grundsätzliche Aussagen über die Technikgüte der Kugel-Drehstoßtechnik über den Drehimpuls möglich waren, muss jedoch berücksichtigt werden, dass eine Modellierung der Kraftwirkung der Kugel und insbesondere der Kraftkopplung zwischen der Hand des Athleten und dem Gerät bisher nur unzureichend realisiert wurde. Prinzipiell ist dies aber möglich. Bezüglich der Validierung dieser Modelle sind jedoch verfeinerte Motion-Capture-Modelle für die Bewegungen des Oberkörpers des Athleten sowie die empirische Bestimmung der Wechselwirkungskräfte notwendig.



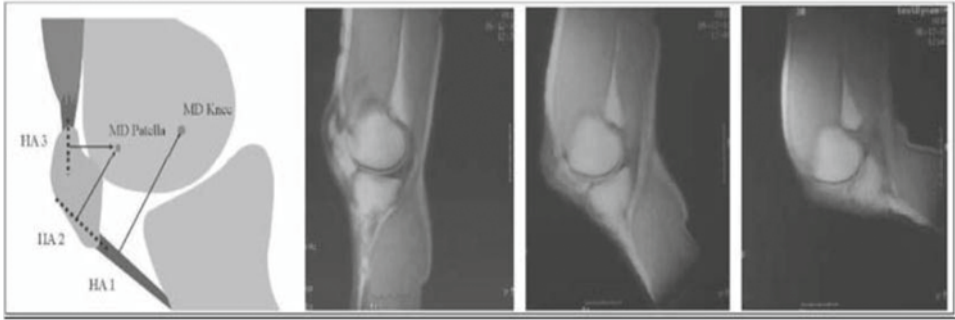
**Abb. 5.29** Simulation eines Ruderzyklus mit Alaska 6.01 incl. Dynamicus. *Links:* Beginn des Zyklus, *rechts:* in der Mitte des Zyklus. (Quelle: Roemer et al. 2011)

Wie biomechanische Modellbildung helfen kann herauszufinden, inwiefern ein Sportgerät für den Sportler auch geeignet ist, wird von Roemer et al. (2011) gezeigt. Sie gehen in ihrer Studie der Frage nach, welchen Einfluss der Body-Mass-Index (BMI) auf die Belastung der unteren Extremitäten beim Trainieren auf einem Ruder-Ergometer hat. Hierzu wurde die Alaska-Software 6.01 in Verbindung mit dem Menschmodell Dynamicus verwendet (vgl. Abb. 5.29). Die Bestimmung der kinematischen Input-Parameter erfolgte mit einem VICON-System. Inverse Kinematik und Dynamik wurden genutzt um die Gelenkwinkel und Drehmomente zu berechnen. Die Ergebnisse zeigen, dass der BMI einen großen Einfluss auf die Kinetik der unteren Extremitäten während des Ruderergometer-Trainings hat. Dies konnte insbesondere für das Kniegelenk nachgewiesen werden. Daraus muss geschlussfolgert werden, dass übergewichtige Personen beim Ruderergometer-Training ein erhöhtes Risiko der Knieüberbeanspruchung eingehen. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass durch die Übergewichtigkeit die erhöhten Umfänge von Bauch, Ober- und Unterschenkel den Bewegungsablauf einschränken und ungünstige Winkel zwischen Kraftwirkungslinie und Gelenk entstehen. Hier werden von Roemer et al. (2011) gefordert, an einem anderen Design des Trainingsgerätes zu arbeiten.

Mit Hilfe einer weiteren Modellierung mit der Alaska-Software 6.01 incl. Dynamicus® wurde die Wechselwirkung zwischen biomechanischen Parametern bei der Beinstreckung und der Haltung bzw. Position des Fußes an der Beinpresse untersucht (Roemer et al. 2012). Hierfür wurde ein Kniemodell erstellt, dessen anatomischen Daten auf der Grundlage von 11 verschiedenen Kniewinkelpositionen mit Hilfe eines offenen MRT ermittelt wurden (vgl. Abb. 5.30).

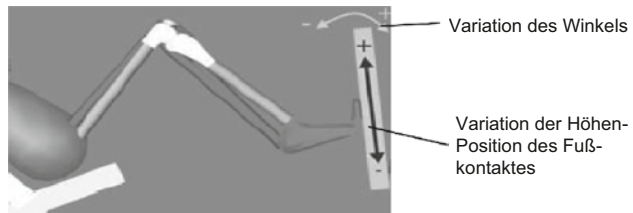
Die Muskelmodellierung basiert auf dem Modell von Hill, als Ersatzmuskeln wurden für den Oberschenkel der m. quadriceps femoris und für den Unterschenkel der m. triceps surae verwendet. Bei der Simulation wurden Winkel und Höhe des Fußkontaktes mit dem Trittbrett variiert (vgl. Abb. 5.31).

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Modellierung des Kniegelenks sehr genau erfolgen muss, da sich der Drehpunkt des Gelenks während der Bewegung (Streckung des Beines) ändert. Es konnte jedoch belegt werden, dass bereits kleine Änderungen der

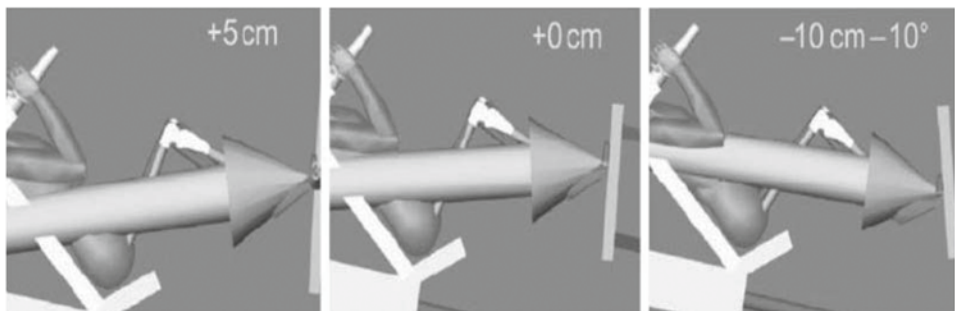


**Abb. 5.30** Kniemodell mit MRT-Bildern. (Quelle: Roemer et al. 2012)

**Abb. 5.31** Variation der Kontaktposition am Trittbrett der Beinpresse. (Quelle: Roemer et al. 2012)



Kontaktpositionen des Fußes auf dem Trittbrett zu großen Änderungen der Muskelkräfte führt (in dem untersuchten Bereich bis zu 10 %). Als Ursache hierfür kann der veränderte Vektor der Bodenreaktionskraft angesehen werden (vgl. Abb. 5.32). Mit dieser Untersuchung konnte bestätigt werden, dass biomechanische Modellierungen durchaus geeignet sind, Wechselwirkungen zwischen Sportler und Gerät zu bestimmen. In diesem speziellen Fall war es möglich, die optimale Stellung der Beine bzw. Füße für das Training mit diesem speziellen Gerät zu finden.



**Abb. 5.32** Variation der Kontaktposition am Trittbrett der Beinpresse und zugehöriger Vektor der Bodenreaktionskraft. (Quelle: Roemer et al. 2012)

---

### Zusammenfassung und Schlussfolgerungen zur Modellbildung

Wie die vorangegangenen Untersuchungen zeigen, sind Modelle durchaus geeignet, einen Beitrag zur Optimierung bzw. Entwicklung von Sportgeräten zu leisten. Sie kommen insbesondere dann zum Einsatz, wenn praktische Erprobungen zu aufwendig bzw. unmöglich sind. Während es vielfache Möglichkeiten gibt, das Gerät selbst zu modellieren (z. B. mit der FE-Methode), gibt es häufig noch Schwierigkeiten bei der Anpassung von biomechanischen Menschmodellen an das Gerätemodell. Dies ist einerseits dem Umstand geschuldet, dass die biomechanische Modellierung des Menschen selbst sehr kompliziert ist, so dass es bisher noch nicht gelungen ist, ein vollständiges Menschmodell zu entwickeln und andererseits man nur wenige Informationen über die zu modellierenden Kontakte zwischen Athlet und Gerät hat bzw. diese schwer empirisch überprüfbar sind. Obwohl aus der Literatur viele biomechanische Modelle bekannt sind, existieren jedoch kaum Modelle, mit denen die Wechselwirkungen (Kräfte, Impulse) zwischen Sportler und Gerät beschrieben werden können. Besondere Defizite und Möglichkeiten zukünftiger Entwicklungen in aktuell existierenden biomechanischen Modellen werden im Folgenden gesehen:

- Modellierung nur von einzelnen Segmenten oder Segmentgruppen
- Nichteinbeziehen der Muskeln (schwer zu vermessen hinsichtlich Geometrie und Aktivität)
- Notwendigkeit einer Vielzahl von anthropometrischen Daten, wodurch ein hoher messtechnischer Aufwand entsteht
- Schwierigkeit bei der Überprüfung der Validität der Modelle (Problem des Messens von Gelenkkraften und Momenten)

Diesbezüglich sind biomechanische Modelle deutlich zu verbessern, auch in Hinblick auf Kontakte mit den Geräten. Erst dann wird es möglich sein, den Einfluss kleiner Detailveränderungen eines Sportgeräts auf die Bewegung des Sportlers zu bestimmen bzw. die Beanspruchung des Bewegungsapparates zu quantifizieren. Doch sollte dies als ein lohnendes Ziel angesehen werden, da hierin ein großes Potenzial für die Optimierung von Sportgeräten gesehen wird.

---

### Literatur

- Alan T, Haake S, Goodwill S (2010a) Effect of friction on tennis ball impacts. Proceeding IMechE Part P. J Sports Eng Tech 224:229–236 (<http://pip.sagepub.com/content/224/3/229>)
- Alan T, Haake S, Simon R, Goodwill S (2010b) Effect of tennis racket parameters on a simulated Groundstroke. J Sports Sci (1. February 2011) 29(3):311–325
- Alan T, Hart J, Spurr J, Haake S, Goodwill S (2010c) Validated dynamic analysis of real sports equipment using finite element; a case study using tennis rackets. 8th Conference on the Intern. Sports Eng. Association (ISEA). Procedia Engineering 2(2010):3275–3280



- Baer DR, Burrows PE, El-Azab AA (2003) Enhancing coating functionality using nanoscience and nanotechnology. *Prog Org Coatings* 47:342–356
- Barsan V, Aldea A (2010) Trends in nanophysics: theory, experiment and technology. Springer, Berlin
- Betzler N, Hofmann M, Shan G, Witte K (2006a) Biomechanical modelling of a golf swing by means of the multibody-kinetics software ADAMS. *Int J Comput Sci Sport* 5(2):52–55
- Betzler N, Hofmann M, Shan G, Witte K (2006b) Biomechanische Modellierung des Golfschwunges mit der Mehrkörpermodellierungssoftware MSC Adams. In: Edelmann-Nusser J; Witte K (Hrsg) *Sport und Informatik IX*. Shaker-Verlag, Aachen
- Betzler N, Shan G, Witte K (2007a) The Influence of different golf club designs on swing performance in skilled golfers. *Proceeding in: APCST 2007 – Asia-Pacific Congress on Sports Technology*
- Betzler N, Shan G, Witte K (2007b) Validation and application of a full-body model of a golfer swinging two different drivers and irons. *Symposium Proceedings 6th IACSS, Calgary*
- Betzler N, Li X, Shan G, Witte K (2007c) Validation and application of a full-body model of a golfer swinging two different drivers and irons. *Symposium Proceedings 6th IACSS, Calgary*
- Bhushan B (2011) *Nanotribology and nanomechanics*. Springer, Berlin
- Binns C (2010) *Introduction to nanoscience and nanotechnology*. Wiley, Hoboken
- Böhm H, Krämer C, Senner V (2006) Optimization of the handbike's drive concept – mathematical approach. In: Moritz EF, Haake S (Hrsg) *The engineering of sport 6*, Aufl. 2: developments for disciplines. Springer, S 121–125
- Bryson A, Smith L (2010). Impact response of sports materials. 8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA). *Procedia Eng* 2(2010):2961–2966
- Clifton P, Subic A, Mouritz A (2010) Snowboard stiffness prediction model for any composite sandwich construction. 8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA). *Procedia Eng* 2(2010):3163–3169
- Colani L, Mailand J, Feldhusen J, Majschak J-P, Schürmann H (2011) Grundlagen der Konstruktionstechnik. In: Grote K-H, Feldhusen J (Hrsg) *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*. 23., neubearbeitete und erweiterte Aufl. Springer, Berlin, S F1–F38
- Collins F, Brabazon D, Moran K (2010) The dynamic viscoelastic characterisation of the impact behavior of the GAA slotar. 8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA). *Procedia Eng* 2(2010):2991–2997
- Cross R (2000) Flexible beam analysis of the effects of string tension and frame stiffness on racket performance. *Sports Eng* 3: 111±122.
- Dänhardt M, Harig C, Witte K (2009) Entwicklung eines Verfahrens zur Quantifizierung der durch die Fersengeometrie eines EVA-Laufschuhs verursachten Fußgelenkkinematik mittels eines Modells des Fußaufsatzes. In: Witte K, Edelmann-Nusser J (Hrsg) *Einsatz neuer Analyse- und Modellmethoden in der Sportbiomechanik. Neue Technologien im Sport Bd 1*. Shaker-Verlag, Aachen, S 49–64
- Ehrlenspiel K (2009) *Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe Methodeneinsatz Zusammenarbeit*. 4., überarbeitete Aufl. Carl Hanser Verlag, München
- FES (2012) <http://www.fes-sport.de/bob.htm>. Zugegriffen: 15. März 2012
- FINA (2010) PR59 – FINA BUREAU MEETING. [http://www.fina.org/project/index.php?option=com\\_content&task=view&id=2543&Itemid=107](http://www.fina.org/project/index.php?option=com_content&task=view&id=2543&Itemid=107). Zugegriffen: 23. Apr. 2013
- FISA Rule Book (2011) <http://www.worldrowing.com/fisa/resources/rule-books>. Zugegriffen: 15. März 2012
- Fischer C, Fauve M, Combaz E, Bourban P-E, Michaud V, Plummer CJG, Rhyner H, Manson J-AE (2006) Dynamic properties of materials for Alpine Skis. In: Moritz EF, Haake S (Hrsg) *The engineering of sport 6*, Aufl. 1: developments of sport. Springer, S 264–268
- Flory F, Escoubas L (2004) Optical properties of nano – structured thin films. *Prog Quant Electron* 28:89 ff.

- Ganter N, Witte K, Edelmann-Nusser J (2011) Biomechanische Modellierung der Drehstoßtechnik im Kugelstoßen. dvs -Tagung Biomechanik, Jena
- Glitsch U (2001) Computer simulation of alpine skiing. In: Müller E et al (Hrsg) Science and skiing II. Kovac-Verlag, Hamburg, S 141–154
- Hildebrand F, Perl B (2007) Moderne Techniken des Diskuswerfens. Z Angew Trainingswissenschaft 14(2):39–65
- Huber G, de Uhlenbrock AG, Götzen N, Bishop N, Schwieger K, Morlock MM (2009) Modellierung, Simulation und Optimierung. In: Gollhofer A, Müller E (Hrsg) Handbuch Sportbiomechanik. Hofmann-Verlag, Schorndorf
- Irandar CJ, Berglund G (2006) Sandvik Nanoflex® – designed for ultimate performance. In: Moritz EF, Haake S (Hrsg) The Engineering of Sport 6, Aufl. 3: developments for innovations. Springer, S 113–118
- Jackstien M, Witte K (2008) Modellierung und Simulation eines Tennisschlägers mit MSC.Adams. In: Edelmann-Nusser J, Moritz EF, Senner V, Witte K (Hrsg) Sporttechnologie zwischen Theorie und Praxis V. Shaker-Verlag, Aachen, S 135–144
- Kaiser M, Himmel N (2006) Carbon fiber reinforced plastics – trendsetting material for high performance racing bike chassis. The engineering of sport 6, Aufl. 3: developments for innovations. Springer, S 123–128
- Kaufmann J, Kroll L, Odenwald S (2010) Application-specific design of sports equipment from anisotropic fiber-reinforced plastics with stiffness related coupling effect. 8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA). Procedia Eng 2(2010):2529–2535
- Knecht P (Hrsg) (2003) Funktionstextilien. Deutscher Fachverlag GmbH, Frankfurt a. M.
- Lemburg J (2009) Methodik der schrittweisen Gestaltsynthese. Shaker-Verlag, Aachen
- Mecheels J (1998) Körper – Klima – Kleidung. Wie funktioniert unsere Kleidung? Verlag Schiele und Schön, Berlin
- Müller M (2004) Entwicklung eines innovativen Klapprades und Betrachtung von Produktmodellen. Unveröffentlichte Semesterarbeit Nr. 2161. Lehrstuhl für Produktentwicklung, TU München
- Nachtigall W (2002) Bionik. Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Springer, Berlin
- Pahl G, Beitz W, Feldhusen J, Grote K-H (2007) Konstruktionslehre. Grundlagen. Springer, Berlin
- Palermo V, Jones D (2004) Formation of nanoclusters on silicon from carbon deposition. Appl Surf Sci, 226(1-3):191–196
- Paschen H (2004) Nanotechnologie: Forschung, Entwicklung, Anwendung. Springer, Berlin
- Ponn J, Lindemann U (2011) Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen. 2. Aufl. Springer, Berlin
- Pugh AW, Hamilton R, Nas DH, Otto SR (2010) Characterization of the materials of golf ball construction for use in finite element analysis. 8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA). Procedia Eng 2(2010):3231–3236
- Ranga D, Strangwood M (2010) Finite element modeling of the quasi-static and dynamic behavior of a solid sports ball bases on component material properties. 8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA). Procedia Eng 2(2010):3287–3292
- Roemer K, Hamilton S, Richter C (2011) Kinetics of the lower extremities in ergometer rowing depend on body mass index (In: Vilas-Boas M, Kim V (Hrsg) Biomechanics in Sports 29). Port J Sport Sci 11(Suppl 2)
- Roemer K, Jungnickel U, Lindner F, Milani TL (2012) Multi-body system model of the knee joint and its applications. Math Comput Model Dyn Syst 16(5):391–402
- Roos E, Maile K (2011) Werkstoffkunde für Ingenieure. Grundlagen, Anwendung, Prüfung. Springer, Berlin
- Runciman RJ, Lyle K, Patrick L (2011) Canoe paddle resonance characteristics and modeling. Proceeding IMechE Part P. J Sports Eng Technol 225:1–10



- Senner V, Böhm H, Lehner S (2004) Computersimulation und Experiment: Untrennbare, intelligente und effektive Kombination für die Sportgeräteentwicklung. In: Moritz EF, Edelmann-Nusser J, Witte K, Roemer K (Hrsg) Sporttechnologie zwischen Theorie und Praxis II – Innovationen, Modelle und Methoden. Shaker-Verlag, Aachen, S 115–137
- Slater C, Otto SR, Strangwood M (2010) The quasi-static and dynamic testing of damping in golf clubs shafts fabricated from carbon fibre composites. 8th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA). Procedia Eng 2(2010):3287–3292
- VDI 2221 (1993) VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung
- Witte K, Edelmann-Nusser J, Winkler V (2008) Nanotechnologie und Sportgeräte – Verbesserung von Oberflächen- und Grenzflächeneigenschaften an Sportgeräten durch nanotechnologische Entwicklungen. Bundesinstitut für Sportwissenschaft. Wissenschaftliche Berichte und Materialien. BISp Hausdruckerei des StBA, Bonn. ISBN: 978-3-939390-61-9

### **Studentenarbeiten: Diplomarbeiten, Studienarbeiten, Belege zu Studienprojekten und Semesterarbeiten, die von der Autorin betreut wurden**

- Andernach M (2008) Drei Methoden der Bootslamination im Vergleich. Unv. Studienarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Dänhardt M (2005) Entwicklung eines Verfahrens zur Quantifizierung der durch die Fersengeometrie eines EVA – Laufschuhs verursachten Fußgelenkkinematik mittels eines Modells des Fußaufsatzes. Unv. Diplomarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Sportgerätetechnik

Entwicklung und Optimierung von Sportgeräten

Witte, K.

2013, X, 216 S. 118 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-642-34701-6