

## **Interne Modelle und motorisches Lernen – Grundlagen und Schneesportbeispiele**

---

### **1 Einleitung**

Mit diesem Text möchte ich Kolleginnen und Kollegen, die Schneesport an Universitäten unterrichten, anhand von Beispielen aus unserer Sportart über neue theoretische Überlegungen zum motorischen Lernen informieren. Die meisten dieser Überlegungen habe ich – zusammen mit Ernst-Joachim Hossner – bereits im Handbuch *Bewegungslehre – Bewegungswissenschaft* niedergelegt (Hossner & Künzell, 2003).

Motorisches Lernen wird dort definiert als die „relativ überdauernde Änderung der Kompetenz, in bestimmten Situationen durch ein bestimmtes Verhalten bestimmte Effekte zu erzielen“ (ebd., S. 132). Eine Abgrenzung gegenüber Trainings- und Motivationseffekten wird gewährleistet, indem eine „relativ überdauernde Änderung der Kompetenz“ gefordert wird. Sie findet sich in vielen Definitionen zum motorischen Lernen. Erst in jüngerer Zeit wieder aufgegriffen wurde die Sichtweise, dass die aktuelle Situation, der Verhaltensakt und der Effekt der Bewegung untrennbar mit dem motorischen Lernen verbunden sind (Vorüberlegungen dazu gab es aber schon bei Herbart, 1816; James, 1890; Lotze, 1841; vgl. einen Überblick von Stock & Stock, 2004). Dies spiegelt die funktionale Sichtweise der Autoren wider – in ihren Augen ist es von fundamentaler Bedeutung, wozu das motorische Lernen dient, nämlich Effekte in der Umwelt zu erzielen.

### **2 Funktionale Betrachtung von motorischer Kontrolle und motorischem Lernen**

Geht man davon aus, dass alle Geschöpfe, die motorisch lernen, den Gesetzmäßigkeiten der Evolution unterworfen sind, so können es allein die in der Umwelt erzielten Effekte sein, die evolutionär wirksam werden. Nur dadurch, dass auf bestimmte Umweltsituationen angepasst reagiert werden kann – sei es, dass schleunigst eine freundlichere Umgebung aufgesucht wird oder sei es, dass die Umwelt nach den eigenen Bedürfnissen gestaltet wird – können evolutionäre Vorteile geschaffen werden. Eine evolutionäre Grundlegung des motorischen Lernens ist deswegen plausibel, da es sich dabei nicht um eine Fähigkeit handelt, die dem

Menschen vorbehalten ist und ihm nur auf Grund seiner kulturellen Entwicklung zur Verfügung steht, sondern weil motorisches Lernen ein „evolutionär alter“ Mechanismus ist, der schon sehr früh im Laufe der Entstehung der Arten etabliert worden ist. Natürlich spielen auch die Fähigkeiten des Menschen zur bewussten Planung von Handlungsprozessen und deren Änderung für das motorische Lernen eine Rolle. Sie stehen jedoch hier nicht im Vordergrund der Betrachtung, sondern es wird das motorische Lernen „im Vollzug“, d.h. das Lernen der Prozesse, die unmittelbar der motorischen Kontrolle dienen, thematisiert.

Wenn dazu sowohl die aktuelle Situation als auch die zu erzielenden Effekte wichtig sind, wird deutlich, dass Wahrnehmung und Handlung ineinander verschränkt betrachtet werden müssen. Handlung wird dabei als ein zielgerichtetes oder effektgesteuertes Verhalten verstanden. Motorisches Lernen beschränkt sich also nicht auf die Veränderung der Beziehung zwischen Reiz und Reaktion, d.h. zwischen Wahrnehmung der Ausgangssituation und der Kontrolle der Handlung, wie dies beim Klassischen Konditionieren, aber auch bei der Theorie der generalisierten motorischen Programme angenommen wurde. Gleichfalls ist aber auch eine Beschränkung auf die Veränderung der Kompetenz, Effekte in der Umwelt zu erzielen, beispielsweise durch operantes Konditionieren oder durch einen Regelkreis-Mechanismus, zu kurz gegriffen, um motorisches Lernen in Gänze zu begreifen.

In modernen Theorien zum motorischen Lernen wird ein Tripel berücksichtigt: Der angestrebte Effekt, die wahrgenommene Ausgangsbedingung und die Bewegung. Das Lernproblem besteht dabei darin, die Bewegung zu finden, die unter den gegebenen Ausgangsbedingungen die erwünschten Effekte bewirkt. Ein Fehler liegt dann vor, wenn der erwünschte Bewegungseffekt nicht erreicht wird, wenn also der erwünschte und der tatsächliche Effekt nicht übereinstimmen.

### **3 Lernmechanismen**

Auf der Grundlage dieser Überlegungen sind einige Theorien und Mechanismen zum motorischen Lernen vorgeschlagen worden, von denen ich hier zwei referieren möchte: Die Theorie der internen Modelle, die vor allem im angloamerikanischen Raum zahlreiche Vertreter besitzt (Davidson & Wolpert, 2003; Ito, 2000; Jordan & Rumelhart, 1992; Kawato, 1999; Miall, 2002; Narendra, 1995; Wolpert, Doya & Kawato, 2003; Wolpert & Kawato, 1998), sowie der Mechanismus der antizipativen Verhaltenskontrolle, den Hoffmann vor allem im deutschsprachigen Raum populär gemacht hat (Hoffmann, 1993b).

#### *Antizipative Verhaltenskontrolle*

Hoffmanns Lernmechanismus ist schon oft und auch in sportwissenschaftlichen Beiträgen wiedergegeben worden (Hoffmann, 1993a; Hoffmann, 2001; Hossner & Roth, 2000; Kröger & Roth, 1999), deswegen werde ich hier nur kurz darauf eingehen. Er wird durch Abbildung 1 veranschaulicht. Unter einer wahrgenommenen

Ausgangssituation  $S_{\text{Ausg}}$  führt eine Reaktion  $R$  zu einem Bewegungseffekt  $K_{\text{real}}$ . Diese Konsequenz der Bewegung wird vom kognitiven System antizipiert ( $K_{\text{ant}}$ ). Das Fehlermaß ist die Differenz zwischen dem antizipierten und dem erwünschten Effekt der Bewegung  $|K_{\text{ant}} - K_{\text{real}}|$ . Ist diese Differenz gleich Null, wird die Beziehung zwischen den Ausgangsbedingungen, der Reaktion und der antizipierten Konsequenz verstärkt. Falls reale und antizipierte Konsequenz nicht übereinstimmen, wird die Wahrnehmung differenziert, weil in diesem Fall, so Hoffmann, eine andere als die bisher kennen gelernte Ausgangsbedingung vorherrschen muss.

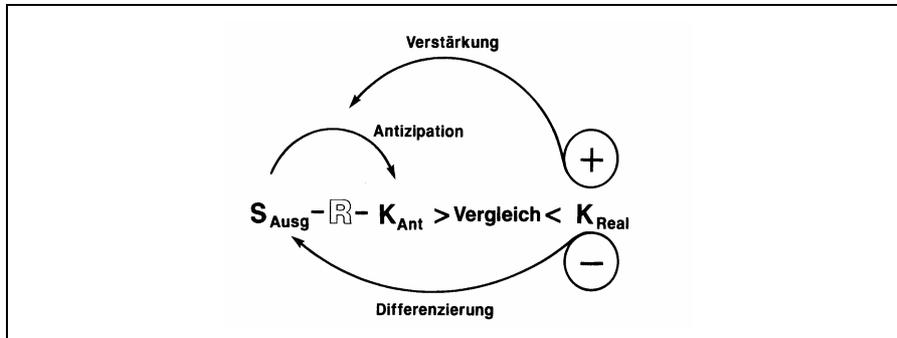


Abb. 1. Hoffmanns Mechanismus der Antizipativen Verhaltenskontrolle.

Diesen Mechanismus hat Hoffmann 2001 differenziert (vermutlich stimmte der antizipierte Effekt dieses Mechanismus innerhalb der *scientific community* nicht mit dem realen Effekt überein). Dabei werden zwei Lernprozesse konzipiert. Der primäre Lernprozess wirkt auf die bidirektionale Verbindung zwischen dem intendierten Verhaltensakt und dem antizipierten Effekt (dies entspricht  $R$  und  $K_{\text{ant}}$  in Abb. 1), der sekundäre auf die bidirektionale Verbindung zwischen dem Ausgangsreiz und dem intendierten Verhaltensakt ( $S_{\text{Ausg}}$  und  $R$ ). Damit verändert Hoffmann sein Modell so, dass es große Ähnlichkeit mit der im nächsten Abschnitt vorgestellten Theorie der internen Modelle hat (vgl. Hossner 2004, S. 110).

#### Interne Modelle

Im angloamerikanischen Raum wird zunehmend eine Theorie zum motorischen Lernen und zur motorischen Kontrolle vertreten, die mit internen Modellen arbeitet. Kombinationen aus zwei verschiedenen Modellen wirken dabei zusammen, um unter den gegebenen Ausgangsbedingungen bestimmte erwünschte Effekte in der Umwelt zu erzielen. Sie werden Vorwärtsmodell und inverses Modell genannt.

Das inverse Modell bildet eine Beziehung zwischen dem gewünschten Bewegungseffekt, dem wahrgenommenen Ausgangszustand und den produzierten Efferezen ab. Es ist die Einheit im zentralen Nervensystem (ZNS), die für die Bewegungsproduktion zuständig ist. Wenn von motorischem Lernen die Rede ist, bezieht

sich dies in der Theorie der internen Modelle letztendlich immer auf eine Veränderung des inversen Modells.

Es gibt oft verschiedene Möglichkeiten, einen Effekt zu erzielen, mehrere Bewegungen können zum Ziel führen. Man kann sich das inverse Modell als ein dynamisches System vorstellen, implementiert beispielsweise als rekurrentes neuronales Netzwerk (vgl. z.B. Künzell, 2003). Dieses Netzwerk wird durch Eingabevektoren, die in diesem Fall Wahrnehmung und gewünschten Effekt repräsentieren, aktiviert. Es produziert dann immer genau einen Ausgabevektor. Unter den mehreren Möglichkeiten, einen Effekt zu erzielen, produziert das Netz also immer nur genau eine. In wie weit der Ausgabevektor nun tatsächlich zu dem gewünschten Bewegungseffekt führt ist genau der Lerngegenstand. Dabei können auch Randbedingungen, wie beispielsweise „möglichst ökonomisch“ oder „möglichst elegant“ eine Rolle spielen.

Das Vorwärtsmodell bildet die funktionale Beziehung zwischen dem wahrgenommenen aktuellen Zustand der Umwelt, den an die Muskulatur weitergeleiteten Effenzen und dem Bewegungseffekt ab. Der Bewegungseffekt wird also antizipiert. Dies passiert nicht nur, wenn ein bestimmter Effekt erreicht werden soll, sondern kontinuierlich (zumindest im wachen Zustand). Meist wird dies allerdings nicht bewusst. Den Namen erhielt das Vorwärtsmodell, weil die Wirkung von Kräften auf Körper die „normale“ Berechnungsrichtung der Physik ist, die daher als vorwärts bezeichnet wird. Die umgekehrte Richtung, nämlich der Rückschluss von einer Veränderung eines Zustands auf die dieser Veränderung zu Grunde liegenden Kräfte, wird als die inverse Richtung bezeichnet.

Betrachten wir die Aufgabe der internen Modelle aber nicht formal, sondern funktional. Dazu versetzen wir uns „in die Lage des Gehirns“<sup>1</sup>. Das Gehirn bekommt ständig Eingangssignale, die die Zustandsänderungen „draußen“ widerspiegeln. Daran sind alle Modalitäten, also Augen, Ohren, Nase, Haut, aber auch die kinästhetischen Analysatoren beteiligt. „Draußen“ bedeutet dabei aus Sicht des Gehirns nicht nur den Zustand der Umwelt, sondern auch die Befindlichkeit des eigenen Körpers.

Diese einkommenden Signale sind aber nicht neutral, sondern sie werden bewertet. Menschen besitzen einen angeborenen und vermutlich durch evolutionäre Mechanismen optimierten Bewertungsmechanismus. Schmerz oder Hunger werden beispielsweise negativ bewertet, während gestreichelt werden oder etwas Leckeres zu essen positive Bewertungen erfahren. Später erlauben Lernprozesse dem Menschen, ausgefeiltere Bewertungskriterien zu entwickeln, nebenbei eine Eigenschaft, die den Menschen deutlich von Tieren abhebt. „Aufgabe“ des Gehirns ist es, dafür

---

<sup>1</sup> Dieses Ideenexperiment hat in der Philosophie eine lange Tradition, die jüngst wieder von Hossner (2004) aufgegriffen wurde. In seinem „Badischen Zimmer“ sitzt als „Gehirn“ ein Chinese, der keine lateinischen Buchstaben entziffern kann. Die hier wiedergegeben Überlegungen werden dort – wesentlich detaillierter, umfangreicher und lesenswerter formuliert.

zu sorgen, dass es dem Menschen in seiner Umwelt gut geht, dass also möglichst nur positiv bewertete Signale einkommen. Um dies zu erreichen, kann es (efferente) Signale aussenden, die über die Erregung der Muskulatur sowohl den Zustand des eigenen Körpers als auch den Zustand der Umwelt verändern können. Diese Zustandsänderung hat dann einkommende Signale zur Folge. Wenn das Gehirn seine Aufgabe erfüllt hat, sind diese einkommenden (afferenten) Signale positiv bewertet.

Um den Zustand der Umwelt effektiv zu ändern setzt das Gehirn wiederum auf angeborene, evolutionär optimierte Verbindungen. Eine simple Verbindung ist, beim Einkommen von unerwünschten Signalen anzufangen zu schreien. Dadurch werden häufig Effekte erzeugt, die das Einkommen erwünschter Signale zur Folge haben, beispielsweise die Nahrungsaufnahme. Da das angeborene Verhaltensrepertoire beim Menschen aber sehr begrenzt ist, reichen diese angeborenen Verhaltensweisen nicht weit und es muss gelernt werden.

Aus der Sicht des Gehirns ist das Lernen dann erfolgreich, wenn Signale ausgesendet wurden, die zur Folge haben, dass die einkommenden Signale positiv bewertet werden. Dazu muss es aber zunächst Kenntnis darüber besitzen, welche ausgehenden Signale (unter welchen Bedingungen) welche einkommenden Signale zur Folge haben. Genau dies erledigt das Vorwärtsmodell. Das Gehirn bewertet also den aktuell wahrgenommenen Zustand und ermittelt, was sich verändern muss, damit er positiver bewertet werden kann: der intendierte Zustand. Damit produziert dann das inverse Modell ausgehende Signale. Mit diesen Informationen produziert das Vorwärtsmodell den antizipierten Effekt, letztendlich sieht es also vorher, welche Signale denn wohl demnächst eintreffen werden.

Was das Ganze nun mit Schneesport zu tun hat? Nun, ich hoffe, dass dies im nächsten Kapitel deutlich werden wird.

#### **4 Interne Modelle und antizipative Verhaltenskontrolle beim Schneesport**

##### *Erfolgreiche Bewegungskontrolle*

Wenn wir die oben besprochenen Mechanismen auf den Schneesport anwenden, können die funktionalen Aspekte von Vorwärtsmodell und inversem Modell bei sportlichen Bewegungen veranschaulicht werden. Nehmen wir eine Skifahrerin, die auf einem mittelsteilen Hang gerade eine Rechtskurve gefahren ist und sich am Ende der Steuerphase befindet. Damit das Skifahren weiter geht, muss die Skifahrerin eine Bewegung vollziehen. Diese Bewegung soll den Effekt haben, dass sie daraufhin eine Linkskurve fährt. Der gewünschte Bewegungseffekt ist also das Fahren einer Linkskurve.

Die wahrgenommenen Ausgangsbedingungen beziehen sich sowohl auf die Umwelt als auch auf den eigenen Körper. Wahrgenommen wird zum Beispiel der Neigungswinkel des Hangs, die Ebenheit des Geländes, das vermutlich durchfahren

wird, die Griffigkeit des Schnees, aber auch die Körperlage, die Vorspannung der Muskulatur und die Gelenkwinkel. Alle diese Informationen fließen in das inverse Modell ein und werden dort verarbeitet. Als Ergebnis dieser Verarbeitung produziert das inverse Modell efferente Signale an die Muskulatur, die dann eine Bewegung verursachen.

Mit dem Abschicken dieser Efferenzen wird zugleich deren Kopie an das Vorwärtsmodell weitergeleitet. Darüber hinaus stehen dem Vorwärtsmodell ebenfalls alle Wahrnehmungsinhalte zur Verfügung. Das Vorwärtsmodell entwickelt auf dieser Grundlage eine Antizipation dessen, was wohl mit dem Körper und mit der Umwelt passieren wird, letztendlich also eine Vorhersage der demnächst eintreffenden Wahrnehmungsinhalte. Diese könnten beispielsweise sein, dass die Spannung der Beinmuskulatur bei der Hochentlastung abnehmen wird, dass die Knie kippen werden, dass der Stock beim Einsatz nach unten einen Widerstand erfahren wird, der sich auf den Arm und den Körper überträgt, dass der Körper nach vorn und talwärts kippen wird, dass das für das Carven durch den Schnee typische Geräusch auftreten wird und so weiter.

Diese antizipierten Effekte werden dann mit den eintreffenden Rückmeldungen über die tatsächlich stattfindenden Effekte verglichen. Beispielsweise ist es tatsächlich so, dass eine Linkskurve gefahren wird, dass die Knie kippen, dass der Stock bei seinem Einsatz auf einen Widerstand stößt und so weiter.

Als „normalen“ Fall möchte ich hier bezeichnen, dass die antizipierten Resultate auch tatsächlich eintreffen. Dies bezieht sich also auf bereits gekonnte und vielfach geübte Bewegungen und trifft vor allem auf Alltagsbewegungen zu, wie beispielsweise Fortbewegung, Gestik und Mimik oder Artikulationsbewegungen beim Sprechen. Für geübte Skifahrer wird dies aber auch beim „normalen“ Skifahren auf einem einfachen Hang der Fall sein, ebenso wie beim Dribbeln eines Basketballers und bei der Delphinbewegung einer Schwimmerin. Dieser Fall ist so „normal“, dass es auch nicht notwendig ist, bewusste Kontrolle über die Bewegung auszuüben. Weder das Bilden der Antizipation noch das tatsächliche Eintreffen der antizipierten Effekte muss bewusst verarbeitet werden. Dass die Antizipationen aber in jedem Fall gebildet werden, kann man dann erkennen, wenn sie überraschenderweise einmal nicht eintreffen: Wenn beim Gehen die berühmte Bananenschale in die Quere kommt, wenn bei der Geländeabfahrt der Stock plötzlich beinahe widerstandslos durch die Schneedecke bricht, wenn eine Treppenstufe weniger vorhanden ist als wir erwartet haben zieht dies sofort die bewusste Kontrolle auf sich. Dies kann natürlich nur deshalb erfolgen, weil Antizipationen gebildet wurden, die eben nicht eintreffen.

In dem „normalen“ Fall läuft jedoch alles wie von alleine, so dass von außen besehen man meinen könnte, die Bewegungen vollziehen sich „automatisch“. Jedoch: Die ausgeführten Bewegungen sind in hohem Grad an die jeweilige Situation angepasst (vgl. Bootsma & van Wieringen, 1990). Und sie sind jederzeit dem Be-

wusstsein zugänglich. Und ich kann – sofern dies biomechanisch möglich ist – die Bewegung jederzeit unterbrechen und einen anderen Effekt ansteuern. Insofern ist die Redeweise von „automatisierten“ Bewegungen aus der Außensicht zwar verständlich, geht aber, wenn man aus der Innensicht die zu Grunde liegenden Prozesse betrachtet, an der Realität vorbei (vgl. Hossner, 2003, S. 24). Treffender ist es, von einer unbewussten oder impliziten Kontrolle der Bewegung zu sprechen.

Im „normalen“ Fall, dass bei einer Bewegung der gewünschte Bewegungseffekt mit dem antizipierten Bewegungseffekt und dem dann auch tatsächlich erreichten Bewegungseffekt übereinstimmt, werden die bisher gebildeten Beziehungen zwischen den beteiligten kognitiven Prozessen verstärkt. Darin sind sich alle theoretischen Konzepte einig, sei es nun Hoffmanns antizipative Verhaltenskontrolle oder die Theorie der internen Modelle.

#### *Lernanlässe: Misserfolge bei der Bewegungskontrolle*

Wenn eine Bewegung nicht gelingt, wenn sie also den gewünschten Bewegungseffekt nicht hervorbringt, ist dies ein Anlass zu Lernen. Das große Problem dabei ist, dass oftmals unklar ist, was denn genau besser gemacht werden muss. Trotzdem gelingt es Lernern oft, ohne Hilfe von außen den Bewegungsablauf zu verbessern. Oftmals müssen dafür noch nicht einmal bewusste Prozesse in Anspruch genommen werden, sondern durch häufiges Durchführen von Bewegungen in bestimmten Situationen mit bestimmten Effekten gelingt es immer besser, das Bewegungsziel zu erreichen. In einem solchen Fall spricht man von implizitem oder inzidentellem Lernen.

Offenbar ist das kognitive System also in der Lage, sich so anzupassen, dass der gewünschte Bewegungseffekt immer häufiger und schließlich zuverlässig hergestellt werden kann. Dabei ist zunächst unklar, wo denn die Ursache dafür zu finden ist, dass der gewünschte Effekt der Bewegung nicht eingetreten ist. Zwei Fehlerquellen können unmittelbar die Ursache dafür sein: Zum einen kann es sein, dass die für den Handlungserfolg notwendigen Hinweisreize in der Umwelt oder im eigenen Körper nicht wahrgenommen wurden. Zum anderen ist es natürlich auch möglich, dass die Kontrolle der Bewegung fehlerhaft oder ungenau war und die Bewegung deswegen nicht ihr Ziel erreicht.

#### *Erlernen der Wahrnehmung*

Wir greifen das Beispiel wieder auf, dass eine Skifahrerin nach einer Rechtskurve wieder eine Linkskurve fahren möchte. In der geplanten Bewegungsbahn liegt eine blaugrau schimmernde Fläche, von der erfahrene Skifahrer wissen, dass es sich dabei um eine Eisplatte handelt. Die Skifahrerin aus unserem Beispiel ist aber bisher nur auf griffigen Pisten gefahren und kennt den Unterschied zum Fahren auf Eis noch nicht. Sie fährt also im gewohnten Stil weiter, rutscht zu ihrer Überraschung mit der Kante weg und landet unsanft mit ihrer Hüfte auf der harten Eisplatte. Ein klarer Fall von misslungener Bewegungskontrolle: Das erwünschte Bewegungsergebnis ist nicht das tatsächliche Bewegungsergebnis. Dies passiert überraschend – also nicht

antizipiert. Das antizipierte Bewegungsergebnis war eine sauber gefahrene Linkskurve. Nach dem oben vorgestellten Mechanismus der antizipativen Verhaltenskontrolle stimmen  $K_{\text{ant}}$  und  $K_{\text{real}}$  nicht überein, folglich muss die Wahrnehmung differenziert werden. Dieser Mechanismus scheint angebracht: Differenzierung der Wahrnehmung bedeutet, dass nach erfolgreichem Lernen die Lernende zwischen dem Aussehen einer griffigen Piste und dem Aussehen von Eisplatten unterscheiden kann. Dieses Beispiel erscheint vielleicht etwas trivial, es dient ja auch der Verdeutlichung. Es ist aber auch eindeutig, dass dieser Mechanismus alles andere als trivial ist, denn er kann zu komplexesten Wahrnehmungsdifferenzierungen führen, zu denen nur die größten Meister ihres Fachs fähig sind, wie z.B. das frühe Erkennen von Finten beim Fechten, die Antizipation der Ballkurve im Tennisaufschlag oder das Erkennen der Ideallinie beim Slalomfahren.

Aber, so wichtig der Lernmechanismus von Hoffmann auch ist, er hilft zunächst einmal nicht weiter, was das Erreichen eines Bewegungseffekts betrifft. Gut, unsere Beispielskifahrerin achtet nun darauf, ob eine Eisplatte ihren Weg kreuzt oder nicht. Aber was sie nun auf einer Eisplatte tun soll hat sie noch nicht gelernt<sup>2</sup>. Nur eins weiß sie schon: So fahren wie bisher auf griffiger Piste kann keine Lösung sein. Sie muss ihr Bewegungsmuster anpassen.

#### *Erlernen des Bewegungsgefühls*

Unsere Beispielskifahrerin hat nun viele Möglichkeiten herauszufinden, welche Bewegungssteuerung dazu führt, dass sie auch auf einer Eisplatte den gewünschten Bewegungseffekt, eine Linkskurve zu fahren, erreichen kann. Sie kann sich andere Skifahrer anschauen und versuchen, über das Modell zunächst einmal eine Idee zu bekommen, wie sie ihr Bewegungsmuster verändern kann. Oder sie hat gute biomechanische Kenntnisse und weiß um den Zusammenhang von Aufkantwinkel, Druck und Reibungswiderstand und überlegt sich, durch welche Bewegung sie den Aufkantwinkel erhöhen kann. Oder sie ist jemand, die „learning by doing“ einfach immer wieder ausprobiert, in unterschiedlichen Winkeln mit unterschiedlichen Bewegungen und unterschiedlichen Geschwindigkeiten über Eisplatten zu fahren und so Bewegungserfahrungen zu sammeln. Wie auch immer sie es angestellt hat, sie muss ein Gefühl dafür bekommen, was auf einer Eisplatte passiert, welche Bewegungen unter diesen Bedingungen welche Konsequenzen haben. Und bei allen theoretischen Überlegungen und allem Beobachten ist es (mehr oder weniger) notwendig, tatsächlich Bewegungen auszuprobieren. Wenn wir uns diese Phase des Bewegungslernens mit der Theorie der internen Modelle im Hintergrund genau anschauen, passiert dort Folgendes: Das gewünschte Bewegungsergebnis ist nach

---

<sup>2</sup> Hoffmann untersuchte in seinen Experimenten im Wesentlichen Tastendruckbewegungen. Dort ist die Bewegungsaufgabe als solche trivial, daher ist der Lernprozess abgeschlossen, wenn die Wahrnehmung ausreichend differenziert ist. Bei sportlichen Bewegungen muss dann aber noch die passende Bewegungslösung gefunden werden. Daher taugt Hoffmanns Lernmechanismus auch nicht als „Basisprinzip“ für ein Techniktraining, wie Hossner und Roth (2000) vorschlugen.

wie vor die sauber über die Eisplatte gefahrene Linkskurve. Allerdings fehlt die Kenntnis darüber, was denn nun genau passiert, wenn eine Eisplatte angefahren wird. Die Antizipation des Bewegungseffekts ist also unklar. Da sie sich an den Vorerfahrungen orientiert ist es plausibel anzunehmen, dass ein Sturz oder zumindest ein Rutschen über die Platte antizipiert wird. Das antizipierte Bewegungsergebnis entspricht also nicht dem gewünschten Bewegungsergebnis. Der Lerneffekt tritt in dieser Situation vor allem dann ein, wenn – ebenfalls überraschend und nicht antizipiert – die Bewegung dann doch das gewünschte Ergebnis zur Folge hat, wenn auf einmal die Kurve gelingt. Hier wird jetzt das Vorwärtsmodell angepasst, damit beim nächsten Mal bei der gleichen Bewegungsausführung in der gleichen Situation das Bewegungsergebnis richtig antizipiert wird, nämlich das Durchfahren der Kurve. In diesem Sinne erzeugt also das Vorwärtsmodell das Bewegungsgefühl, nämlich die nicht notwendigerweise bewusste und erst recht nicht notwendigerweise verbalisierbare Antizipation dessen, was wohl bei welchen Bewegungen in der Umwelt geschehen und wie es sich im Körper anfühlen wird.

#### *Erlernen der Bewegungssteuerung*

Wenn unsere Beispielskifahrerin also Bewegungserfahrungen beim Überfahren von Eisplatten gesammelt und ein einigermaßen korrektes Vorwärtsmodell entwickelt hat, hat sie die Möglichkeit, Fehler in der Bewegungssteuerung zu korrigieren. In der Theorie der internen Modelle dient das Vorwärtsmodell nicht nur der Vorhersage der Bewegungseffekte, sondern es übersetzt den Fehler auf der Ebene der Effekte in die Ebene der Efferenzen. Es beantwortet also nicht nur die Frage „Was passiert wenn ich mich so und so bewege?“, sondern auch die Frage „Wie muss ich meine efferenten Signale verändern, wenn ich einen bestimmten Effekt erreichen will?“. Diese entscheidende Frage ist nämlich alles andere als trivial. Bei einem einigermaßen korrekten Vorwärtsmodell liegt bei einem Fehler in der Bewegungssteuerung dann der folgende Fall vor: Auf der Grundlage der wahrgenommenen Situation und dem erwünschten Effekt werden (fehlerhafte) Efferenzen produziert. Dies führt zu einem Bewegungsergebnis, das nicht den gewünschten Effekt hat. Das Vorwärtsmodell, da korrekt, erstellt die richtige Antizipation des Bewegungsergebnisses, nämlich den tatsächlichen, aber unerwünschten Effekt. Am Beispiel: Die Skifahrerin nimmt die Eisplatte wahr und möchte eine Linkskurve fahren. Ihre Bewegungen führen aber zu einem unerwünschten seitlichen Abrutschen. Dieses Abrutschen kommt aber nicht unerwartet, sondern sie hat es bereits antizipiert. In diesem Fall sagt ihr das Vorwärtsmodell (oder das Bewegungsgefühl), wie sie ihre Bewegungssteuerung anpassen muss, dass sie beim nächsten Mal die Kurve besser nimmt.

#### *Systematisierung*

Die oben angeführten Lernbeispiele dienten nicht nur der Veranschaulichung der Theorie der internen Modelle, sondern sie waren gleichzeitig der Vorschlag zur Lösung eines konzeptionellen Problems, das nicht nur dem Lernenden Schwierigkeiten

bereitet, sondern auch bei der Computersimulation von Lernprozessen auftritt: Woher weiß der Lernende, woran erkennt das kognitive System, wo der Bewegungsfehler herrührt? Was soll korrigiert werden, die Wahrnehmung, die Bewegungssteuerung oder das Bewegungsgefühl? Der oben angesprochene Lösungsvorschlag geht davon aus, dass es auf der Ebene der Bewegungseffekte drei Maße gibt, die der Ermittlung der Fehlerquelle dienen: Der intendierte Effekt, der antizipierte Effekt und der tatsächlich eingetretene Effekt der Bewegung. Diese werden nun wechselseitig miteinander verglichen. Wenn tatsächlicher und antizipierter Effekt übereinstimmen, beide aber nicht dem erwünschten Effekt entsprechen, wird das inverse Modell angepasst. Bei Übereinstimmung von antizipiertem und erwünschtem Effekt, die aber beide nicht dem tatsächlichen Effekt entsprechen, wird die Wahrnehmung differenziert. Stimmen schließlich tatsächlicher und erwünschter Effekt überein, ohne dass dies antizipiert wurde, wird das Vorwärtsmodell angepasst.

Darüber hinaus sind noch zwei Grenzfälle zu berücksichtigen. Sollte keins der Fehlermaße mit einem anderen annähernd übereinstimmen, wenn also etwas anderes passiert als erwünscht, aber zusätzlich noch etwas Drittes antizipiert wird, dann kann aus dieser Konstellation kein Lernen erfolgen. Wenn alle drei Fehlermaße übereinstimmen ist – zumindest aus Sicht der Person bzw. des kognitiven Systems – kein Lernen nötig. Wenn ein Skifahrer wahrnimmt, die perfekt geschnittene Kurve gefahren zu sein und ihn dies auch nicht überrascht, weil er es antizipiert hat, kann nur noch ein Lehrer von außen ihn darauf hinweisen, dass seine Wahrnehmung nicht mit einer objektiven Wahrnehmung übereinstimmt und dass noch hohe Rutschanteile vorhanden sind. Die Grenzen des selbstständigen Lernens sind erreicht.

## **5 Und was bedeutet dies für den Schneesportunterricht?**

Die Messlatte, die Unterrichtspraktiker an eine Lerntheorie anlegen, ist eine andere als die von Wissenschaftlern. Während sich letztere an der Vollständigkeit, Widerspruchsfreiheit, Systematik und Sparsamkeit einer Theorie erfreuen, fragen Lehrende zu Recht nach den unterrichtlichen Auswirkungen der Theorie. In der Regel lassen sich Wissenschaftler darauf nicht gerne ein. Vielleicht ist es eine besondere Chance der Sportwissenschaft, dass dort oftmals Wissenschaftler zu Hause sind, die auch praktische Lehrerfahrung in Sportarten haben sowie Lehrkräfte, die es als ihre besondere Aufgabe ansehen, ihre Vermittlungstätigkeit an wissenschaftlichen Theorien zu orientieren. Da allerdings die empirische Grundlage der Theorien die Praxis ist, wird bei den sich aus der Theorie abgeleiteten Praxisempfehlungen selten etwas für den Praktiker Überraschendes dabei sein.

Genug der relativierenden Vorrede. Nach der Theorie der internen Modelle und dem oben vorgeschlagenen Lernmechanismus ergeben sich für den Lehrprozess unterschiedliche methodische Vorschläge, je nachdem, wo die Ursache des Bewegungsfehlers steckt. Zu Beginn des Lernprozesses ist dafür zu sorgen, dass das Vorwärtsmodell einigermaßen korrekt ist, und dass der Lernende lernt vorherzuse-

hen, was in bestimmten Situationen durch seine Bewegungen mit ihm und der Umwelt passiert. Dazu ist es sinnvoll, vielseitige Bewegungserfahrungen zu sammeln. Konzepte wie Geländeparcours oder Skikindergärten sind aus dieser Sicht genau das Richtige. Hilfreich kann aber auch (in Abhängigkeit vom Vorwissen) das kognitive Vermitteln bewegungsspezifischer Zusammenhänge sein (bspw. „Je mehr du aufkantest, desto weniger rutschst du seitlich ab“).

Wenn diese Zusammenhänge „erfahren“ worden sind und das Vorwärtsmodell einigermaßen korrekt ist, sollte der Lernende in der Lage sein, durch Üben sein inverses Modell zu verbessern, also die Bewegungssteuerung zu optimieren. Der Theorie nach ist er in der Lage, dies selbstständig zu tun, also ohne dass die Lehrperson Bewegungskorrekturen geben muss. Objektive Rückmeldung ist nur dann erforderlich, wenn der Lernende subjektiv ein Bewegungsziel erreicht zu haben glaubt, dies aber objektiv nicht der Fall ist. In einem solchen Fall bieten sich Videoanalysen an, meist reicht es aber auch, in schwierigeres Gelände überzugehen, in denen Bewegungsfehler dann zu deutlicheren Effekten führen.

Großer Wert muss auf die Schulung der Wahrnehmung gelegt werden, sowohl was die äußeren als auch was die inneren Bedingungen für Bewegungen angeht. Meist können sich erfahrene Skilehrkräfte gar nicht vorstellen, dass Skischüler unterschiedliche Schneearten oder Wege durch die Buckelpiste einfach nicht (oder viel zu spät) wahrnehmen.

Wie gesagt, die methodischen Konsequenzen aus der Theorie der internen Modelle sollen und werden keine Revolution im Skilehrwesen auslösen und werden viele Lehrkräfte in ihrem Tun bestätigen. Aber erstens ist dies ja schon ein positiver Effekt der Theorie, und zweitens animiert sie ja vielleicht doch den einen oder die andere, über einige methodische Vorgehensweisen in ihrer Lehrpraxis noch einmal neu nachzudenken.

## Literatur

- Bootsma, R.J. & van Wieringen, P.W.C. (1990). Timing an attacking forehand drive in table tennis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 21-29.
- Davidson, P.R. & Wolpert, D.M. (2003). Motor learning and prediction in a variable environment. *Current Opinion in Neurobiology*, 13, 1-6.
- Herbart, J.F. (1816). *Lehrbuch zur Psychologie*. Königsberg: Unzer.
- Hoffmann, J. (1993a). Aufmerksamkeit, Automatisierung und antizipative Verhaltenssteuerung. In R. Daus & K. Blischke (Hrsg.), *Aufmerksamkeit und Automatisierung in der Sportmotorik* (S. 97-120). St. Augustin: Academia.
- Hoffmann, J. (1993b). *Vorhersage und Erkenntnis*. Göttingen: Hogrefe.

- Hoffmann, J. (2001). Das ideomotorische Prinzip, Closed Loops und Schemata. In J.R. Nitsch & D. Hackfort (Hrsg.), *Denken – Sprechen – Bewegen* (S. 69-75). Köln: bps.
- Hossner, E.-J. (2003). Just do it! Eine theoretische Unterfütterung von zehn Thesen zum Techniktraining. In K. Zentgraf & K. Langolf (Hrsg.), *Volleyball aktuell 2002* (S. 19-32). Hamburg: Czwalina.
- Hossner, E.-J. (2004). *Bewegende Ereignisse*. Schorndorf: Hofmann.
- Hossner, E.-J. & Künzell, S. (2003). Motorisches Lernen. In H. Mechling & J. Munzert (Hrsg.), *Handbuch Bewegungswissenschaft – Bewegungslehre* (S. 131-153). Schorndorf: Hofmann.
- Hossner, E.-J. & Roth, K. (2000). Von Typen und Phasen zu einem Basisprinzip für das Techniktraining. In W. Schmidt & A. Knollenberg (Hrsg.), *Sport – Spiel – Forschung: Gestern. Heute. Morgen* (S. 63-75). Hamburg: Czwalina.
- Ito, M. (2000). Internal model visualized. *Nature*, 403, 153-154.
- James, W. (1890). *The principles of psychology* (Vol. I, II). Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Jordan, M.I. & Rumelhart, D.E. (1992). Forward models: Supervised learning with a distal teacher. *Cognitive Science*, 16, 307-354.
- Kawato, M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, 9, 718-727.
- Kröger, C. & Roth, K. (1999). *Ballschule*. Schorndorf: Hofmann.
- Künzell, S. (2003). *Die Bedeutung der Efferenzkopie für das motorische Lernen*. Berlin: dissertation.de.
- Lotze, R.H. (1841). *Metaphysik*. Leipzig: Weidmann.
- Miall, C. (2002). Modular motor learning. *Trends in Cognitive Science*, 6, 1-3.
- Narendra, K.S. (1995). Identification and control. In M.A. Arbib (Hrsg.), *The handbook of brain theory and neural networks* (S. 477-480). Cambridge, MA.: MIT Press.
- Stock, A. & Stock, C. (2004). A short history of ideo-motor action. *Psychological Research*, 68, 176-188.
- Wolpert, D.M., Doya, K., & Kawato, M. (2003). A unifying computational framework for motor control and social interaction. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London: Series B, Biological Sciences*, 358, 593-602.
- Wolpert, D.M. & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, 11, 1317-1329.