

Innovationstheorie und die Evolution menschlicher Fähigkeiten: Beispiel Empathie

Von Alfred GIERER (Tübingen)

Mit 4 Abbildungen

1. Innovation als Initiation selbsttragender Entwicklung

Spezifische Fähigkeiten des menschlichen Gehirns wie die der Sprache, der kognitionsgestützten Empathie und des strategischen Denkens sind Ergebnisse der biologischen Evolution, in den späten Phasen der Menschwerdung wohl auch einer Ko-Evolution von biologischen und kulturellen Faktoren. Es handelt sich um sehr allgemeine Fähigkeiten, die auf eine fast unbegrenzte Vielfalt von Situationen anwendbar sind. Wie bei jeder allgemeinen Innovation – im Bereich der Technik etwa bei der Erfindung des Rades oder der Erzeugung von Elektrizität – wird ein offenes Feld von Möglichkeiten eröffnet, das weit über den Anlaß, die Motive und die Vorteile der Entstehungsphase hinausführt.

Eine bevorzugte Denkrichtung sucht die Evolution des Menschen in erster Linie durch viele kleine Schritte zu erklären, während die Annahme qualitativ bedeutender, einzelner genetischer Schlüsselereignisse in der wissenschaftlichen Diskussion weniger verbreitet ist. Im Streit zwischen »Gradualismus« und »Punktualismus« (MAYR 1988) ist jedoch zwischen sehr verschiedenen Aspekten zu unterscheiden. Obwohl es scheinbar plötzliche und dann wieder sehr allmähliche Phasen der Evolution gibt, darf nicht auf Einzelereignisse mit unmittelbaren großen Wirkungen geschlossen werden. Auch eine scheinbare Explosion von Evolutionsvorgängen in einem kurzen Zeitraum kann in Wirklichkeit auf vielen kleinen Schritten von Mutation und Selektion beruhen, wenn sie sich rasch akkumulieren und sich hinsichtlich der »fitness«-Vorteile sozusagen aufschaukeln. Die Annahme genetischer Schlüsselereignisse ist also gar nicht damit zu begründen, daß es schnelle Entwicklungsphasen gibt, die ebenso gut durch viele kleine Schritte erklärbar sind. Jedoch könnten einzelne Schlüsselereignisse eine *logisch* entscheidende, initiierende Rolle für einen neuen Entwicklungsweg spielen, obwohl die Auswirkungen der Innovation anfangs bescheiden sind und sich erst durch weitere, mehr kontinuierliche Evolution entfalten. Diesen innovationstheoretischen Aspekten gelten die folgenden Überlegungen.

2. Vergleich: Technische Entwicklung – Biologische Evolution: Beispiel Dampfschiffahrt

Ich möchte theoretische Gesichtspunkte zur genetischen Innovation durch den Vergleich mit technischen Innovationen erläutern. Nun ist Innovation ein etwas schillernder Begriff, der einer Definition bedarf. Eine Begriffsbestimmung, die sich im wirtschaftlich-technischen

Bereich bewährt hat und sich für Vergleiche mit der Biologie eignet, definiert Innovation nicht als Erzeugung von Ideen im Kopf des Erfinders, sondern als deren Verwirklichung und Ausbreitung im Markt (siehe MARCHETTI 1988). Zwar gelten für die Technik vielfach andere Regeln als für die biologische Evolution, wobei letztere durch sehr indirekte Beziehungen von Genotyp und Phänotyp, von Veränderungen von Genen einerseits und deren Ausprägung in Strukturen, Verhaltensweisen, Dispositionen und Fähigkeiten andererseits charakterisiert ist; dennoch sind aber die Analogien zur technischen Entwicklung nicht zu übersehen. Zum einen ist es erstaunlich, wie weit man auch in der Technik mit sogenannten Evolutionsstrategien kommt, die – in Anlehnung an die Biologie – Problemlösungen in einem Programm von Versuch und Irrtum suchen, also durch Probieren statt Nachdenken. Zum anderen entsteht in beiden Fällen Neues durch Verknüpfung und Veränderung des Vorhandenen. Die Evolution der Fähigkeiten des menschlichen Gehirns baut in besonderem Maße auf den jeweils schon bestehenden Fähigkeiten auf, um sie neu zu kombinieren, in neue Kontexte einzubeziehen, zu verallgemeinern und weiterzuentwickeln.

Technische Innovationen, also die ökonomische Implementation neuer Ideen und Ideenkombinationen auf dem Markt, beginnen mit Prototypen, die ökonomischen Erfolg haben oder unmittelbar erwarten lassen. In diesem Zusammenhang kann man das Kriterium »ökonomischer Erfolg« bei der Technikentwicklung als durchaus analog zum »fitness«-Vorteil biologischer Evolution ansehen, da beide jeweils die Fortsetzungs- und Ausbreitungsfähigkeit neuer Entwicklungen betreffen – die Ausbreitung der Gene in der Population durch höhere Zuwachsraten als Folge erhöhter »fitness«, die Ausbreitung einer Technik durch die Gewinne bei der Erschließung von Märkten. Die Dynamik technischer Innovation läßt sich an sehr verschiedenen Beispielen zeigen. Wesentliche Parameter sind dabei der Zeitpunkt der Initiation sowie die Ausbreitungsgeschwindigkeit der innovativen Entwicklung.

Die folgende Diskussion bezieht sich zunächst auf den Fall der Dampfschiffahrt, wie er von dem Innovationsforscher MARCHETTI neben anderen Technikentwicklungen quantitativ analysiert wurde. Die Dampfschiffahrt drang mit ökonomisch erfolgreichen Fahrzeugen seit 1807 in den von Segelschiffen beherrschten Schifffahrtmarkt ein. Bezogen auf die Tonnage der US-Handelsflotte erreichte sie in einem zunächst annähernd exponentiellen Anstieg in etwa 70 Jahren die Halbsättigung dieses Marktes (Abb. 1). Was bestimmte die Initiation zu Anfang des 19. Jahrhunderts?

Die Nutzung des Druckes erhitzter Luft und der Dampfkraft für mechanische Vorgänge geht bis in die Antike zurück – allerdings zunächst nicht für die Produktion, sondern für Showeffekte im Theater im späthellenistischen Alexandria. Eine ökonomische Nutzung der Dampfkraft wurde in Europa seit dem 17. Jahrhundert erprobt. Die industriell effiziente Dampfmaschine von James WATT, Mitte des 18. Jahrhunderts erfunden, bildete im 19. Jahrhundert die Basis der Industrialisierung. Im 18. Jahrhundert stellten Akademien Aufgaben zum Schiffsantrieb, experimentelle Dampfboote wurden erprobt, und Spekulanten erwarben schon Monopole für eine Dampfschiffahrt, die es noch gar nicht gab. Innovativ wirksam wurde jedoch erst der Einsatz von WATTS Dampfmaschinen auf Schiffen. Die ersten solchen Schiffe waren aus Holz; die ersten eingesetzten Dampfmaschinen Niederdruckmaschinen. Der Antrieb lief über Schaufelräder. Die Erfolgsrate war zunächst niedrig, der Gewinn schmal, die Verbreitung bescheiden, aber die gelegentlichen und schwachen positiven Effekte waren doch ausreichend, um weitere Entwicklungen zu begünstigen.

Der ökonomisch erfolgreiche Prototyp war FULTONS »Clermont« (1807), die die Strecke New York – Albany auf dem Hudson River befuhr und damit den regulären Dampfschiffahrtsverkehr einleitete (Abb. 2). Eine besondere Rolle, analog zu ökologischen Nischen für die Evolution, spielte in der Anfangsphase die Erschließung des Mississippi durch die berühmten Schaufelraddampfer von 1811 an. Mit der Atlantik-Überquerung der »Savannah« im Jah-

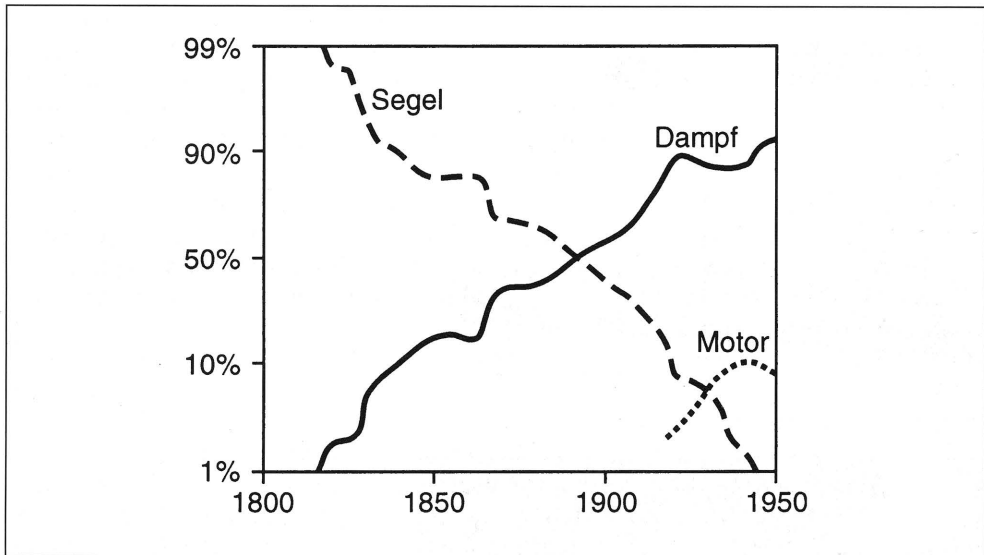


Abb. 1 Anteil der Dampf-, Segel- und Motorschiffahrt an der Handelstonnage der USA (in einer logarithmischen Skala) nach MARCHETTI (1988). Es gibt eine Initiation (siehe Abb. 2) ökonomisch erfolgreicher Dampfschiffahrt zu Beginn des 19. Jahrhunderts, der eine langsame, zunächst annähernd exponentielle Ausbreitung auf dem Schifffahrtsmarkt folgte. Man erkennt die formale Analogie der Ausbreitung technischer Innovation zur Populationsdynamik biologischer Evolution.

re 1818 begann – zunächst eher zaghaft – die Ozean-Dampfschiffahrt. In der Folge wurde die Urkombination »Dampfmaschine plus Schiff« zum Ausgangspunkt quantitativer und qualitativer Fortentwicklungen: Schiffe aus Eisen statt Holz, Antrieb durch Schiffspropeller statt Schaufelräder. Es war das Ozeanschiff »Great Britain«, das 1843 diese Eigenschaften erstmals in sich vereinigte (Abb. 3). Auch semi-quantitative Verbesserungen wurden wirksam: Hochdruck- statt Niederdruck-Dampfmaschinen, Stahl statt Eisen, und damit verbunden eine ziemlich graduelle Entwicklung vom Segler mit Hilfsdampfantrieb über das Dampfschiff mit Hilfssegel zum »reinen« Dampfschiff. Zugleich wurde aber auch die Segelschiffahrt weiterentwickelt und verbessert (Abb. 4). So überrundete der Dampfantrieb im 19. Jahrhundert auf den Weltmeeren in einem relativ langsamen Prozeß die Segelschiffahrt, bis er dann in unserem Jahrhundert selbst durch andere Antriebsformen – hauptsächlich Dieselmotoren – abgelöst wurde. Wichtige Voraussetzung für die weltweite Einführung der Dampfschiffahrt waren auch Wirkungen der Erfindung »Dampfschiff« auf die Umwelt, die dann wieder positiv auf die Ausbreitung der Dampfschiffahrt zurückwirkte – ein Vorgang, der der Ko-Evolution in der Biologie analog ist. Dies gilt vor allem für den Aufbau einer Infrastruktur in Welthäfen, die sich für größere Schiffe eignete und zudem das Bunkern von Kohlen unterwegs ermöglichte. Auch der Bau des Suez-Kanals war in diesem Sinne ein ko-evolutiver Vorgang: Ohne Dampfschiffahrt kein Kanal; mit Fertigstellung des Kanals aber das schnelle »Aus« für die Segelschiffahrt von Europa über das Kap der Guten Hoffnung nach Mittel- und Ostasien, die erst wenige Jahre zuvor mit den berühmten Geschwindigkeitsrekorden der »Tee-Rennen« ihren technischen Höhepunkt erreichte.

Die Innovation »Dampfschiff« erzeugte somit eine neue »fitness«-Landschaft, die weitere Erfindungen und Entwicklungen begünstigte. Im ganzen trug eine Fülle kontinuierlicher Verbesserungen zum Erfolg bei, aber der Ursprung und auch das logische Gerüst der Erklä-

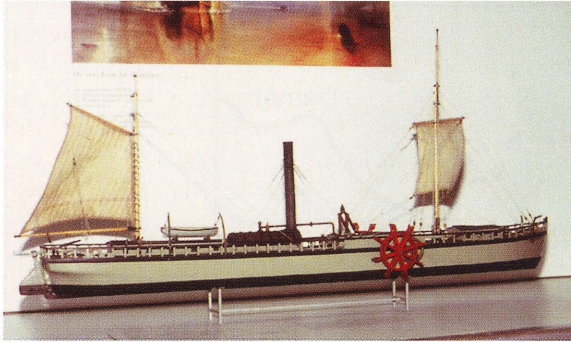


Abb. 2 Der Schaufelraddampfer »Clermont« (1807), die erste kommerziell erfolgreiche Kombination von »Dampfmaschine« und »Schiff«. Modell im Deutschen Museum München, Aufnahme W. GIERER.



Abb. 3 Der Ozeandampfer »Great Britain« (1843), erste Kombination von Dampfmaschine, eisernem Schiffskörper und Schiffschraubenantrieb. Dies zeigt, wie die Realisierung des Prinzips »Dampfschiff« die Voraussetzungen nicht nur für quantitative, sondern auch für weitere qualitative innovative Entwicklungen von großer Tragweite bot. Modell im Deutschen Museum München, Aufnahme W. GIERER.



Abb. 4 Clipper »Republic« (1869). In den Clippern, die hohe Geschwindigkeiten durch riesige Segelflächen bei schlankem Schiffskörper erreichten, fand die Segelschiffahrt ihren Höhepunkt – lange nach der Erfindung der Dampfschiffahrt; erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts hat dann die Dampfschiffahrt die Segelschiffahrt überbunden und abgelöst (siehe Abb. 1). Modell Deutsches Museum München, Aufnahme W. GIERER.

rung ist wesentlich durch die qualitativen Innovationen bestimmt, obwohl sie eigentlich eher Voraussetzungen für Entwicklung schufen als selbst Entwicklung darstellten.

Es sind diese Merkmale einer innovativen Entwicklung, die in analoger Weise auch für biologische Evolutionsprozesse von Interesse sein könnten, insbesondere für die Entstehung

allgemeiner Gehirnfähigkeiten: Die Neukombination und Veränderung von Genbereichen, die an der Gehirnentwicklung beteiligt sind, konnte neue Fähigkeiten begründen.

Es ist selbstverständlich, daß sich Ähnlichkeiten mit der Technik nur auf einige Aspekte erstrecken, während andere durchaus verschieden sind. Die Genveränderungen, die den Anfang einer biologischen Innovation bewirken, betreffen sicher nur einen sehr kleinen Teil des Genoms und wirken sehr indirekt auf die Gehirnentwicklung. In der Regel haben sie wohl zunächst noch keine sehr deutlichen phänotypischen Ausprägungen, die erst durch viele weitere Schritte der Evolution zustandekommen, während in der Technik schon der erste Prototyp »hardware« von erkennbar neuem Typ ist. Solche Unterschiede heben aber die wesentliche Gemeinsamkeit nicht auf: In *beiden* Fällen handelt es sich um die Initiation einer neuen Richtung, die im Falle der biologischen Evolution die Ausbreitung in der Population einleitet, im Falle der Technik die Ausbreitung im Markt.

3. Evolution von Grundfähigkeiten des modernen Menschentyps

Die letzte Abzweigung der Evolutionslinie zum Menschen von der zum Schimpansen erfolgte vor etwa fünf Millionen Jahren. Vormenschen entwickelten den aufrechten Gang, ein größeres Gehirn, die Fähigkeit, Werkzeuge zu machen und zu gebrauchen, und dieses und anderes Wissen von einer Generation zur nächsten zu tradieren. Eine eigendynamische Kulturentwicklung, die im Laufe einer begrenzten Zahl von Generationen zu markanter kultureller Weiterentwicklung und Differenzierungen führt, gab es aber vermutlich noch nicht.

Zu den erstaunlichen biologischen Erkenntnissen aus der letzten Zeit gehören die Ergebnisse vergleichender Genforschung, die darauf hinweisen, daß die gesamte heutige Menschheit von einer möglicherweise kleinen Gruppe abstammt, die vor etwa zweihunderttausend Jahren in Afrika gelebt hat. Nicht so klar ist, ob der moderne Menschentyp schon sehr früh eine besondere Art bildete oder ob sich zunächst die Gene und Genkombinationen, die die besonderen Fähigkeiten des modernen Menschen begründen, in weitere Populationen ausbreiteten, um dann andere Menschenarten zu verdrängen, wie dies zuletzt den Neandertalern in Europa vor etwa dreißigtausend Jahren widerfuhr. Damals entstanden die Kunstwerke, die in Höhlen der Eiszeit noch heute zu bewundern sind, mit sehr realistischen Malereien von Tieren, aber auch mit komplexen abstrakten Zeichen, deren kulturspezifische Bedeutung wir nicht mehr verstehen (siehe CHAUVET et al. 1995). Spätestens seit dieser Zeit gibt es eine eigendynamische Kulturentwicklung, die sich in Kunst und Technik niederschlug. Sie führte vor etwa 10000 Jahren zur Erfindung der Landwirtschaft, vor etwa 5000 Jahren in die Entwicklung der Hochkulturen geschichtlicher Zeit.

Möglicherweise gab es wesentliche Genveränderungen mit initiierenden Wirkungen für generalisierende Fähigkeiten des menschlichen Gehirns um die Zeit, in der der heutige Menschentyp seinen genetischen Ursprung zu haben scheint – vor ein- oder einigen hunderttausend Jahren in Afrika; aber die Deutung molekulargenetischer Daten ist noch sehr im Fluß, und das generelle, hier vertretene Konzept der Bedeutung singulärer Innovationen ist von der zeitlichen Zuordnung zu dieser Phase der Menschwerdung nicht logisch abhängig.

4. Molekulargenetische Grundlagen innovativer Evolutionsschritte

Wie könnten einzelne oder wenige genetische Veränderungen die Evolution neuer allgemeiner Fähigkeiten bewirken? Wie kann überhaupt eine begrenzte Zahl von Genen komplexe, über weite Bereiche des Gehirns verteilte Verschaltungen des neuralen Netzwerkes systematisch beeinflussen? Jede Zelle eines Organismus enthält in der Regel die gleiche Erbsubstanz

DNA, die im Prinzip die Instruktionen zum Aufbau des Organismus im Laufe der Entwicklung enthält. In jedem Zelltyp und in den verschiedenen Positionen und Phasen der Entwicklung eines Organismus sind aber im allgemeinen verschiedene Gene aktiv, andere inaktiv. Eine Vielzahl von Regelprozessen ist daran beteiligt; eine Schlüsselrolle spielen dabei Prozesse am Genom selbst (siehe ARNONE und DAVIDSON 1997). Dem einzelnen Genabschnitt, der ein bestimmtes Protein kodiert, sind Regelsequenzen vor- und zwischengeschaltet. Kurze Folgen von z. B. 10–20 Nukleinsäurebausteinen vermögen jeweils bestimmte Regelproteine zu binden, und wenn die Bindung erfolgt ist, so kann das Regelprotein auf die Startstelle der Genaktivierung aktivierend oder inhibierend wirken. Der ganze Satz von regelproteinbindenden Sequenzen – auch »Enhancer« und »Silencer« genannt, je nachdem, ob sie aktivierend oder inhibierend wirken – funktioniert auf raffinierte Weise kombinatorisch und bildet in gewissem Sinne einen Mikroprozessor für das betreffende Gen. Er rechnet sozusagen die in dem Satz von Regelproteinen enthaltenen Informationen über die Position der Zelle im Gewebe, dem Typ der betreffenden Zelle und dem Stadium der Entwicklung um in die Entscheidung, ob und wieviel von dem betreffenden Genprodukt in der jeweiligen Situation gemacht wird. Manche der regulierten Gene sind selbst wiederum Regelgene. Vieles weist darauf hin, daß die Genregulation kombinatorischen Prinzipien folgt, und daß es eine Kaskade von Regelprozessen gibt, mit einer Hierarchie von Regelgenen, deren obere Schicht aus Hauptschaltern der Entwicklung besteht. Hierarchische und kombinatorische Genregulierung bestimmt nicht zuletzt die Entwicklung des neuralen Netzwerkes im Gehirn. Dabei können einzelne Gene auch weite Gehirnbereiche betreffen.

Ein Teil der Gene eines Organismus kodiert solche Proteine, die am Auswachsen der Nervenfortsätze, ihrer Navigation in Richtung auf das Ziel und ihrer Verschaltung mit Zielzellen im Gehirn beteiligt sind. Die Aktivierung dieser Gene wird durch Regelgene gesteuert, und alle diese Gene zusammen bestimmen die Entwicklung des neuralen Netzwerkes im Gehirn – zumindest in groben Zügen. Elektrische Aktivitäten des Netzwerkes vermögen dann Struktur und Funktion des Netzwerkes weiter zu verändern und zu verfeinern (siehe GIERER und MÜLLER 1995). Im Endeffekt entsteht so eine funktionale Architektur des neuralen Netzes, die allen Fähigkeiten und Eigenschaften des Gehirns zugrundeliegt; sie umfassen erbliche Verhaltensanlagen – z. B. für die Fortpflanzung –, aber auch allgemeine Fähigkeiten, darunter die menschlichen Fähigkeiten der Sprache, des strategischen Denkens und der Empathie.

Diese molekulargenetischen Konzepte zur kombinatorischen und hierarchischen Regulierung neuronaler Entwicklung bilden zwar noch keinen Beweis, sie sind aber doch konsistent mit unserer Hypothese: Die Evolution generalisierender Fähigkeiten des menschlichen Gehirns könnte durch wenige, aber wichtige genetische Veränderungen initiiert worden sein. Vermutlich spielten dabei Regelgene der oberen Hierarchie der Genregulation eine Schlüsselrolle. Die Duplikation eines mikroprozessierenden Regelteils und seine Rekombination in einen neuen genetischen Kontext läuft auf die Erprobung neuer Kombinationen von bereits existierenden Subroutinen der Genregulation hinaus – und zwar im Hinblick auf resultierende neue Funktionsmerkmale, insbesondere neue Fähigkeiten der Informationsverarbeitung durch das neurale Netzwerk. Die Anfangsauswirkungen und die Anfangeffizienz werden gering gewesen sein, konnten sich dann aber durch viele weitere Schritte der Anpassung und Effizienzsteigerung in der innovativen Evolutionsrichtung entfalten.

5. Zentrale Rolle der Selbstrepräsentation

Welche Eigenschaften des Gehirns könnten von solchen Genveränderungen mit richtungsinittierender Wirkung auf die Evolution betroffen sein? Charakteristisch für den modernen

Menschentyp sind genetisch angelegte, sehr allgemeine Fähigkeiten, die auf eine ungeheure Vielfalt von Situationen anwendbar sind und der Fähigkeit unserer Spezies zur Kulturge-schichte zugrundeliegen. Sie ist durch Eigendynamik charakterisiert: Information erzeugt Information, technischer Fortschritt erzeugt technischen Fortschritt, kulturelle Differenzierung erzeugt kulturelle Differenzierung, und zwar ohne daß in diesem Prozeß noch weitere genetische Veränderungen erforderlich wären. Kultur-dynamik beruht auf Sprache und Abstraktion, auf Erinnerung und Planung über eine ganze Lebenszeit hinweg. Entscheidend ist die Fähigkeit zum strategischen Denken, welches eine umfassende Selbstrepräsentation der Person in ihrem eigenen Gehirn voraussetzt; man kann in einem über-tragenen Sinne von »Selbstbildern« sprechen – nicht im wörtlichen Sinne in Form räumlicher Abbildungen, sondern kodiert als abstrakte Merkmalskombinationen der eigenen Person, die dann aber auch ihre eigenen mentalen Vorstellungen und Gefühle einschließen – also eine Selbstrepräsentation im Gehirn, die Gehirnzustände mit umfaßt. Solche Selbstrepräsentation ist insbesondere für strategisches Denken deshalb so wesentlich, weil sie erlaubt, verschiedene Handlungsoptionen samt ihren Folgen zu vergleichen, um zu entscheiden, welche der möglichen künftigen Zustände der *eigenen* Person emotional positiv oder negativ zu bewerten sind, um die Handlungsstrategie dementsprechend einzurichten.

Die zentrale Bedeutung der Selbstrepräsentation für die Fähigkeiten des modernen Menschentyps zur Kulturentwicklung und zu strategischem Denken legt die Hypothese nahe, daß ein genetisches Schlüsselereignis, das vor vielleicht hundert- oder zweihunderttausend Jahren einen biologischen Ausgangspunkt der heutigen Menschheit bildete, die Begründung – oder zumindest eine starke Verallgemeinerung – mentaler Selbstrepräsentation war. Eine oder wenige genetische Veränderungen könnten Verschaltungsmerkmale im Gehirn so beeinflußt haben, daß der analytische Apparat des Gehirns sozusagen auf seinen eigenen Inhalt angewendet wurde, mentale und emotionale Zustände eingeschlossen. Derartige Selbstbezüge sind zwar im Prinzip anfällig gegen Widersprüche und notwendig unvollständig, da kein Gebilde eine vollständiges Abbild seiner Selbst enthalten kann. Dennoch kann Selbstrepräsentation im Normalfall eine gute Näherung für die Einschätzung persönlicher Zukunftsoptionen im Rahmen des strategischen Denkens darstellen. In Kombination mit der Entwicklung von Sprache und anderen Fähigkeiten konnte sie sich bis hin zur Kulturfähigkeit des heutigen Menschentyps weiterentwickeln, und seit vielleicht vierzigtausend Jahren dominiert die Kultur-dynamik über genetische Veränderung.

6. Evolution des menschlichen Bewußtseins: Gründe für Grenzen einer naturwissenschaftlichen Theorie

Selbstrepräsentation ist notwendige Voraussetzung für Bewußtsein, eine ebenso zentrale wie rätselhafte Eigenschaft des menschlichen Gehirns. Eine vollständige Definition dafür liefert sie nicht. Man kann Selbstbezug auch in einen Computer einprogrammieren, ohne ihn deshalb als bewußt zu betrachten. Eine hinreichende Definition von Bewußtsein ist schwierig, vielleicht prinzipiell unmöglich. Bewußtsein ist uns unmittelbar gegeben – in der Regel ohne Kenntnis von physikalischen Prozessen im menschlichen Gehirn. Zwar sind Bewußtseinsprozesse mit physikalischen Prozessen im Nervensystem eng und vermutlich eindeutig verknüpft. Daraus folgt aber nicht zwingend, daß es eine vollständige Theorie der Gehirn-Geist-Beziehung geben müßte: Konsequenter Physikalismus verträgt sich logisch durchaus mit entscheidungstheoretischer Skepsis. Hirnprozesse sind sehr komplexe raumzeitliche Vorgänge im Netz von Milliarden von Neuronen. Es gibt eine unübersehbare Zahl denkbarer Bewußtseinszustände mit subtilen, aber für unser Befinden und Verhalten wichtigen Unterschieden.

den. Es muß kein finitistisches, in einer endlichen Welt physikalisch realisierbares Entscheidungsverfahren geben, um alle wesentlichen Bewußtseinsmerkmale aus den physikalischen Gehirnzuständen abzuleiten. Besonders die selbstbezogenen Aspekte von Bewußtsein dürften in finitistischen Verfahren kaum vollständig aus physikalischen Daten über Vorgänge im Nervennetz zu ermitteln sein. Es gibt vielmehr entscheidungstheoretische Gründe für die Vermutung, daß eine vollständige Dekodierung der Gehirn-Geist-Beziehung prinzipiell nicht möglich ist (GIERER 1983). Solche Grenzen hängen mit der Problematik von Selbstanwendung zusammen, die auch für Bewußtsein von Bewußtsein gilt. Obwohl die Physik im Gehirn vollständig gilt, geht bewußtes Erleben vermutlich über das hinaus, was objektiv mit endlichen Mitteln erschließbar ist.

Eine so begründete Irreduzierbarkeit des Seelischen auf das Physische widerspricht keineswegs der Auffassung, daß das menschliche Bewußtsein eine Folge der biologischen Evolution des menschlichen Gehirns ist. Es ist im Gegenteil durchaus plausibel, daß eine so grundlegende biologische Innovation wie die Selbstrepräsentation zu einem Überschuß an Eigenschaften führt, wie man sie bei anderen generalisierbaren Innovationen auch findet. So wie aus der Erfindung des Rades nicht alle denkbaren Anwendungen folgen, dürften auch bei der Erfindung umfassender Selbstrepräsentation in Gehirnen von Lebewesen nicht alle denkbaren Eigenschaften, die sich daraus entwickeln könnten, schon im Grundprinzip erkennbar sein.

7. Evolution der Empathie als Nebenprodukt des strategischen Denkens

Zu den für Verhalten und Selbstverständnis des Menschen ganz wesentlichen Fähigkeiten gehört nicht zuletzt die menschliche Empathie. Wir können uns in andere hineinversetzen und ihre Empfindungen in gewissem Maße teilen, und zwar nicht nur in bezug auf unmittelbare Gefühle wie Schmerz oder gegenwartsbezogene Ängste, sondern auch in Beziehung auf Hoffnungen, Befürchtungen und Erwartungen für die weitere Zukunft.

Wie weit Tiere empathiefähig sind, ist eine besonders schwer zu entscheidende Frage. CHENEY und SEYFAHRT (1992) schreiben in »How monkeys see the world«, daß Affen – einschließlich der Schimpansen – wenig Empathie zeigen. Allerdings demonstrieren besonders die Untersuchungen von DE WAAL (1997), daß sie auch erstaunlicher Freundschafts-, Hilfs- und Versöhnungsgesten fähig sind. Es scheint sich aber doch um unmittelbare Reaktionen – z. B. nach einem Streit – zu handeln; weiterreichende, zeitintegrierende Perspektiven in die Zukunft sind vermutlich nicht beteiligt. Verhaltensstudien, bei denen Kognition im Spiel ist, führten POVINELLI und PREUSS (1995) zu der Annahme, daß sich Menschen und andere Primaten qualitativ unterscheiden: Vermutlich gibt es spezifisch menschliche, also genetisch angelegte Fähigkeiten, die »das Verhältnis zum sozialen Universum grundlegend und für immer verändert haben«. In dieser Linie des Denkens, die bisher eher einer Minderheitenmeinung entspricht, liegt auch die von mir vertretene innovationstheoretische Auffassung zur Menschwerdung: Kognitionsgestützte Empathie, die sich auf zukünftige Zustände anderer erstreckt und zum Beispiel Rollenspiele einschließt, ist eine spezifisch menschliche Fähigkeit.

Ich möchte zunächst die Hypothese begründen, daß diese Fähigkeit als Nebenprodukt der Entwicklung des strategischen Denkens entstanden ist. Das letztere beruht – wie schon besprochen – auf umfassender Selbstrepräsentation realer ebenso wie möglicher, für die Zukunft erhoffter oder befürchteter Zustände der eigenen Person. Gutes strategisches Denken erfordert, Handlungsoptionen in ihren Konsequenzen für künftige mögliche *eigene* Zustände zu vergleichen und emotional so zu bewerten, daß voraussichtlich emotional positiv er-

lebte künftige Zustände der eigenen Person erreicht werden. Gutes strategisches Denken macht es aber auch nötig, *fremdes* Verhalten vorherzusehen und in die eigenen Strategien einzubeziehen. Vorhersagen für das zukünftige Verhalten anderer können in gewissem Maße auf Erfahrungen in der Vergangenheit, also auf gewöhnlichen Lernprozessen aufbauen. Viel wirksamer ist aber häufig ein ganz anderes Verfahren: Wir versuchen uns in die Lage anderer hineinzuversetzen, *deren* emotionale Bewertungen von *deren* Situationen als *eigene* Gefühle nachzuvollziehen und so zu bestimmen, wie sich andere voraussichtlich verhalten werden – aufbauend auf der Einsicht, daß sich Menschen in ihren mentalen und emotionalen Grundvoraussetzungen sehr ähnlich sind, ähnlich wie wir selbst. Ein Nebenprodukt dieses emotionalen Nachvollzugs fremder Befindlichkeiten ist aber das Mitleid, das dazu motiviert, fremdes Leiden zu verringern. Im Konfliktfall werden im Mittel egoistische Motive überwiegen; aber das gilt nicht für jede Person und jede Situation. Mitempfinden ist durch kulturspezifische Sozialisation aktivierbar und stabilisierbar. Die Empathiefähigkeit hat somit zwei Aspekte: Den egoistischen der verbesserten Prognosefähigkeit im Rahmen des strategischen Denkens, den altruistischen einer Aktivierung von Solidarität und Kooperation ohne Erwartung äußerer Vorteile. Das Spektrum tatsächlichen menschlichen Verhaltens ist weit und reicht von Mutter TERESA bis Al CAPONE. Empathie ist eine ebenso wichtige wie fragile Quelle von Gemeinnutz; von Art und Grad seiner kulturspezifischen Aktivierung wiederum hängt die Lebensqualität einer Gesellschaft ganz wesentlich ab.

Die biologische Basis sozialen Verhaltens wurde früher gerne dadurch erklärt, daß Kooperation der Erhaltung der Art dient. Diese Erklärung ist in der einfachen Form nicht haltbar, denn die Evolution wirkt nicht auf Gruppen oder gar Arten, sondern auf das Genom des Individuums, unter Umständen auf einzelne Gene. Darum begünstigt Evolution in der Regel egoistisches Verhalten auch innerhalb der Gruppe – ein Verhalten, das die jeweils eigenen Reproduktionschancen stärkt. Dennoch gibt es zwei anerkannte, evolutionsbiologisch erklärbare Quellen altruistischen Verhaltens: Kooperation zugunsten von Verwandten, die viele der eigenen Gene teilen, und deren Vorteile sich zugunsten der Vermehrung eigener Gene in der Population auswirken (HAMILTON 1964, MAYNARD-SMITH 1964), und die Kooperation auf eigene Kosten jetzt – in Erwartung von Gegenleistung des Kooperationspartners später (TRIVERS 1971, AXELROD und HAMILTON 1981). Zweifellos spielen auch für Menschen diese zwei Arten von altruistischem Verhalten, Kooperation unter Verwandten und Kooperation im Wechselspiel von Leistung und Gegenleistung, eine große Rolle. So wichtig aber die Erkenntnis erscheint, daß evolutionsbiologisch egoistisches Verhalten leicht und altruistisches Verhalten gegenüber Verwandten und Kooperationspartnern nicht allzu schwer erklärbar ist – man kann nicht alle Aspekte sozialen Verhaltens unter dem Gesichtspunkt subsumieren: »wenn schon nicht das Individuum egoistisch ist, so sind es wenigstens einzelne Gene«. Diese Regel ist immer dann zu einfach, wenn eine Verhaltensweise von vielen Genen mit vielen verschiedenen Wirkungen mitbestimmt wird und wenn ein bestimmtes Gen Auswirkungen in verschiedenen sozialen Kontexten hat. Die Regel kann auch nicht alle Interaktionen in sozialen Gruppen erfassen, zumal, wenn sich Verhaltensdispositionen auf längere Zeiträume beziehen. Dies gilt nicht zuletzt für menschliches Sozialverhalten, einschließlich der Auswirkungen von kognitionsgestützter Empathie. Entstanden als Nebenprodukt der Entwicklung des strategischen Denkens erscheint sie als eine dritte, unabhängige Quelle altruistischen Verhaltens. Sie kann Hilfe und Solidarität aus Mitempfinden induzieren, wenn auch nur in Grenzen und abhängig vom sozialen und kulturellen Kontext.

Die evolutionsbiologische These lautet: Die Fähigkeit zur menschlichen Empathie entstand durch die Verbindung der Repräsentation anderer mit dem jeweils eigenen Gefühlszentrum im Gehirn, so daß wirkliche und mögliche fremde Zustände die eigenen Emotionen ansprechen konnten. Zwar gibt es Rudimente der Selbstrepräsentation und unmittelbar wirk-

samer Empathie auch bei Schimpansen und möglicherweise bei anderen Primaten – und die Evolution menschlicher Empathie konnte auch darauf aufbauen –, aber kognitionsgestützte Empathie ist doch charakteristisch für die Spezies »Mensch«. Diese Innovation konnte, evolutionsbiologisch gesehen, auf eine Verallgemeinerung von Selbstrepräsentation zu Fremdrepräsentation im Gehirn zurückgehen, die mit dem eigenen Gefühlszentrum verbunden bleibt oder wird. Für die Reihenfolge der entsprechenden Evolutionsvorgänge sind zwar verschiedene Möglichkeiten denkbar, entweder die Erweiterung der bereits mit Gefühlszentren verbundenen Selbst- und Fremdrepräsentationen auf die Repräsentationen möglicher zukünftiger Zustände im Kontext strategischen Denkens, oder aber die nachträgliche Verknüpfung solcher zeitintegrierenden Repräsentationen mit den jeweils eigenen emotionalen Zentren. In jedem Fall aber könnten die Vorgänge, die zu menschlicher kognitionsgestützter Empathie führten, entscheidend durch eine oder wenige genetische Veränderungen initiiert worden sein, welche innovative Verschaltungsmerkmale in das neurale Netzwerk einbrachten. Das neurobiologische Korrelat ist unbekannt; Vermutungen gehen insbesondere in Richtung des präfrontalen Cortex, der an der Integration von höheren Hirnfunktionen beteiligt und stark mit den Gefühlszentren des limbischen Systems verknüpft ist. Der präfrontale Cortex scheint für kognitionsgestützte Bewertungen von Emotionen eine besondere Rolle zu spielen (DAVIDSON and SUTTON 1995).

Der – vermutlich unscheinbaren, aber richtungsbestimmenden – Initiation folgte die mehr graduelle Evolution zu effizienten Fähigkeiten, wobei die »fitness«-Vorteile für die Selektion wesentlich die Vorteile der Entwicklung und Ausbildung des strategischen Denkens waren, aber als Nebenprodukt die menschliche Empathiefähigkeit als neue Quelle altruistischen Verhaltens entstehen konnte, zusätzlich zu den Quellen »Verwandtenhilfe« und »reziproker Altruismus«.

8. Innovation von Systemeigenschaften

Gehirnentwicklung verstehen erfordert letztlich, die indirekten Bezüge von Netzwerken der Genregulation zu neuronalen Netzwerken und deren Funktionen zu begreifen. Bei der Evolution des modernen Menschentyps sind vermutlich in relativ kurzen Zeiträumen von der Größenordnung von vielleicht hunderttausend bis eine Million Jahren qualitativ neue generalisierende Fähigkeiten entstanden.

Die Schlüsselrolle der Generalisierung führt dabei oft zu konzeptionellen Mißverständnissen – die Erweiterung von spezialisierten auf allgemeine Fähigkeiten ist nicht nur ein quantitativer, sondern auch ein qualitativer Vorgang. Ein Beispiel ist die Evolution der menschlichen Sprachfähigkeit von der spezialisierten Lautkommunikation tierischer Vorläufer zu einer auf fast alles anwendbaren, auf weitgehende Abstraktion aufbauenden Sprache. Dies entspricht nicht einfach einer quantitativen Erweiterung des Repertoires; es beruht vielmehr auch auf innovativen Fähigkeiten, zum Beispiel zur grammatischen Strukturierung, die ihrerseits eine genetische Basis in der Entwicklung des menschlichen Gehirns haben müssen, wie indirekt auch immer; und solche Innovation könnte durchaus durch singuläre genetische Veränderung ausgelöst werden.

Auch für die entscheidende Rolle von Initiation für die Generalisierung gibt es eindrucksvolle Analogien der Technikgeschichte, zum Beispiel die Netzversorgung mit elektrischem Strom, die 1882 eingeleitet wurde. Das Prinzip der Elektrodynamik – Erzeugung von Elektrizität durch Magnetfelder, Erzeugung von Magnetfeldern durch Elektrizität – war seit FARADAY schon ein halbes Jahrhundert bekannt. Der Dynamo war erfunden, der das für die Elektrizitätserzeugung notwendige Magnetfeld selbst erzeugt. Das Prinzip »Beleuchtung durch

Elektrizität« war bereits realisiert; eine Kohlenbogenlampe erhellte in Paris den Platz vor dem Gare du Nord. EDISON entwickelte die erste Glühlampe, die verlässlich funktionierte. Die Erfinder SIEMENS und EDISON betonten entschieden das generalisierende Potential ihrer Erfindungen – des Dynamos für Stromversorgung an jedem Ort, der Glühlampe für elektrisches Licht für Millionen Menschen. Die ökonomisch entscheidende Innovation war dann aber die Verbindung dieser Erfindungen zum Gesamtsystem. Dies führte in die Generalisierung der Elektrizitätsversorgung von »irgendwo« auf »fast überall«, von »für wenige« auf »für fast alle« und im weiteren Verlauf von »Strom für Licht« auf »Strom aus der Steckdose für beliebig viele Anwendungen«. Die erste Anlage eines Elektrizitätswerkes für ein verzweigtes Stromnetz – vorwiegend zur Versorgung von Glühlampen – war EDISONS 1882 errichtetes Kraftwerk in der Pearl Street von New York, und bald folgte das erste Stromnetz in Deutschland, im Bauer-Block der Berliner Friedrichstraße. Wer würde bezweifeln, daß es einzelne, kleinräumige Initiationen waren, die weltumfassend die Entstehung von Stromnetzen einleiteten?

Ein jüngeres Beispiel von Innovation durch Systemintegration ist der Erfolg des Containers im Seeverkehr: Normierte Blechkisten einer landtransportfähigen Größe, verbunden mit moderner Logistik der Weg- und Zielplanung, haben Seeverkehr und Häfen grundlegend verändert, seit in den sechziger Jahren Sea-Land, anfangs eher belächelt, mit dem systemgesteuerten Containereinsatz in der Handelsschifffahrt begann. Dieses Beispiel technischer Innovation eignet sich besonders zum Vergleich mit biologischer Evolution, zumal von Gehirnfähigkeiten, aus zwei Gründen: Zum einen wegen der Rolle, die logistische Fähigkeiten von Computern dabei spielen, zum anderen wegen der sehr unscheinbaren Anfänge – schließlich gab es schon vor den sechziger Jahren genormte Behälter ebenso wie vielfältige elektronische Datenverarbeitung. Phänotypisch war der Anfang ein kleiner Schritt, die Konsequenzen der neu eingeschlagenen Richtung mit der Kombination »Container«, »Logistik« und »Schiff« waren aber von weltweiter Bedeutung. Ein logisch besonders interessanter Typ technischer Erfindungen, der wohl ebenfalls Analogien in der Evolution höherer Fähigkeiten des menschlichen Gehirns hat, ist die rück- und selbstbezogene Erzeugung der jeweils eigenen Voraussetzungen eines Prozesses. Beispiele sind der Dynamo, der den für die Elektrizitätsgewinnung nötigen Magnetismus selbst erzeugt, ebenso wie das Düsenaggregat, das die für den Antrieb erforderliche verdichtete Luft selbst komprimiert. In gewissem Sinne darf man auch die Iteration dazurechnen, die für die Funktion von Computern eine entscheidende Rolle spielt und physikalisch darauf beruht, daß in der mikroelektronischen Verschaltung das Ende mit dem Anfang eines Prozesses verbunden ist. Allgemein dürfte gelten: Die spezifische Kombination und Integration von Systemkomponenten zu funktionierenden Gesamtsystemen ist qualitativ und innovativ – das betrifft konzeptionell aber nicht nur die Technik, sondern auch die biologische Evolution generalisierender Fähigkeiten des menschlichen Gehirns.

9. Grenzen des Gradualismus

Man fragt sich, woher die dennoch verbreitete Neigung zu rein gradualistischen Evolutionskonzepten der bloßen Akkumulation kleiner Schritte kommt und warum sie so beständig ist, obwohl auch viele molekulargenetische Entdeckungen keineswegs für einen gleichmäßigen Fluß der Evolutionsprozesse sprechen. So heißt es zum Beispiel in dem Standardwerk »Molecular Biology of the Cell« (ALBERTS et al. 1996) in Zusammenhang mit Transpositionen von genetischem Material von einem Kontext des Genoms in einen anderen:

»Cataclysmic changes in genomes called transposition bursts involve near-simultaneous transpositions of several types of transposable elements increasing the probability that two new traits that are useful together but not of selective value by themselves will appear in a single individual in a population.«

Allein schon dieses molekulargenetische Beispiel weckt Zweifel, ob die im üblichen Sinne des Wortes »gradualistischen« Konzepte dem Spektrum der genetisch wirksamen Mechanismen gerecht werden. Es ist offensichtlich, daß in Populationen von der Größenordnung Millionen in Verbindung mit einer großen Anzahl von Generationen, wie sie für die Zeitskala der Evolution charakteristisch sind, seltene genetische Veränderungen und – als Folge der sexuellen Vermehrung – spezifische Kombinationen von Varianten tatsächlich vorkommen, auch wenn sie pro Individuum sehr unwahrscheinlich sind. Es erscheint logisch einsichtig, daß die seltenen Ereignisse durchaus eine Schlüsselrolle für das Verständnis der Evolution spielen können, insbesondere der Evolution von neuronalen Netzwerken im Gehirn.

Mainstream ist solches Denken aber noch nicht, zumal wenn es um Prozesse auf der oberen Hierarchieebene der Gehirnentwicklung geht, die für die Menschwerdung eine Rolle spielen. In der Suche nach den Gründen hat MAYR (1988) darauf hingewiesen, daß schon für DARWIN ein Motiv eine ganz besondere Rolle spielte: Gradualistische Evolution ist intuitiv am meisten von der Gedankenwelt der Schöpfungstheologie entfernt, die er widerlegen wollte. Oft wird auch die grobe strukturelle Ähnlichkeit von Teilbereichen der Großhirnrinde als Argument gegen sehr spezifische genetische Veränderungen benutzt, ebenso, wie die angeblich geringen Unterschiede zwischen den Genomen des Schimpansen und des Menschen: ein Prozent der Nukleotide, aber doch immerhin 30 Millionen Nukleotide an Zahl. Auch in der Diskussion aktivitätsabhängiger Prozesse sind Tendenzen erkennbar, die Rolle genetischer Voraussetzungen als gering anzusehen. Nicht selten wird eine graduelle Entstehung von Fähigkeiten der ständigen Vergrößerung der Großhirnrinde im Laufe der Evolution zugeschrieben. Trotz des intellektuellen Charmes von allem, was mit Selbstorganisation zu tun hat – kaum jemand würde, um zum Vergleich mit der Innovation in der Technik zurückzukommen, die Zunahme der Schiffgrößen im 19. Jahrhundert als befriedigende Erklärung der Entwicklung der Schiffstechnik akzeptieren.

Natürlich kann die Technikgeschichte keine biologischen Probleme lösen; aber innovativ-theoretische Ansätze, die sowohl Technik als auch Biologie einbeziehen, können auch den konzeptionellen Erklärungsrahmen erweitern, zumindest aber Aufgeschlossenheit für Erklärungsalternativen vermitteln. Insgesamt legen es die theoretischen Überlegungen nahe, daß qualitative singuläre Innovationen nicht nur für die Technikentwicklung, sondern auch für die biologische Evolution von größerer Bedeutung sind, als dies häufig angenommen wird. Die unmittelbaren Wirkungen dürften marginal und als komplexe Eigenschaften des neuralen Netzwerkes im Gehirn nicht äußerlich sichtbar gewesen sein, also phänotypisch durchaus als »gradualistisch« bezeichnet werden. Logisch betrachtet aber können einzelne seltene initiierende Veränderungen auf dem Genniveau durchaus neue Richtungen der Evolution begründen. Es wäre eher erstaunlich, wenn dies keine wesentliche Rolle für evolutionsbiologische Erklärungen der Entstehung menschlicher Grundfähigkeiten spielen würde, zu denen auch die kognitionsgestützte Empathie gehört.

Allerdings, insgesamt ist der Beitrag der Evolutionsbiologie zum Verständnis des Menschen zwar erheblich, aber doch auch begrenzt. Die Kulturfähigkeit ist ein Ergebnis biologischer Evolution, die Kultur selbst ist es nicht. Die Fähigkeit zur kognitionsgestützten Empathie ist in den Genen angelegt, ihre Ausprägung ist jedoch wesentlich von kulturellen Einflüssen und individueller Sozialisation mitbestimmt. Ganz allgemein setzt die biologische Herkunft des Menschen Grund- und Randbedingungen für die Ausgestaltung menschlicher Gesellschaften, aber die Ausgestaltung selbst ist eine Kulturleistung, die hinsichtlich der Lebensqualität einer Gesellschaft sowohl sehr schlechte als auch ziemlich erträgliche Lösungen zuläßt.

Theory of Innovation and the Evolution of General Human Capabilities, such as Cognition-based Empathy

Most general capabilities of the human brain, such as language, mental self-representation, long-term strategic thought and cognition-based empathy appear to have evolved quite recently, perhaps only some hundred thousand years ago. Mainstream explanations are mostly gradualistic. For instance, the evolution of brain capabilities is often discussed in relation to increases in brain size. However, innovative pathways of evolution may very well have been initiated by singular genetic events which had only small immediate effects but opened up new directions for subsequent evolutionary change. Over the course of many generations, given populations of millions of individuals, rare novel combinations of genomic sequence have a finite chance of occurring. Molecular genetics reveals mechanisms – such as sudden bursts of transpositions – which do not fit into conventional gradualistic concepts and increase the probability of highly specific genetic changes. Gene regulation has combinatorial and hierarchical features: A network of regulatory proteins regulates the expression of proteins, among them, further regulatory proteins. Regulatory regions of genes contain sets of binding sites for regulatory proteins. In the developing organism, these sets can be considered as modules or processors of information contained in the stage- and context-dependent combination of regulatory proteins. In particular, brain development is to a large extent programmed indirectly by regulatory parts of those genes that code for proteins which, in turn, determine the development of the neural network, thus specifying network features and functional properties. Presumably, high levels of the hierarchy of gene regulation influence high levels of organization of the neural network in wide subareas of the brain; organization involved in the generalized capabilities with extensive ranges of application. The evolution of such capabilities might then be initiated by novel combinations of modules and subroutines of hierarchical and combinatorial gene regulation, followed by many small steps in the innovative evolutionary direction, giving rise to new – or strongly upgraded and generalized – capabilities of the brain. A hypothetical example is the self-representation of possible future states in an individual's own mind as it is essential for strategic thought; self-representation requires the application of the analytical system of the brain to its own content at large. This line of thought, though preliminary in many aspects, is beyond metaphor; it is based on systems-theoretical notions, relating systems of gene regulation involved in neural development with corresponding general capabilities of the resulting neural systems.

Since biologists are not, as a rule, sympathetic to rare non-gradualistic elements in explanations of evolution, it may be helpful to compare biological evolution of novel features with other fields of innovation, such as technology. In this paper, system aspects of innovation in general will be discussed for both technological and biological developments, with the histories of steam ships, electric supply systems and containerized sea transportation as technological examples, and ideas on the evolution of human cognition-based empathy as a biological model case.

According to evolutionary theory, genetically encoded behavioural dispositions normally favour selfish behaviour increasing the genetic fitness of the individual. Exceptions allowing for altruistic behaviour are the support of relatives, describable in terms of »inclusive fitness«, as well as »reciprocal altruism« underlying cooperative behaviour. In addition, I consider empathy, and especially human cognition-based empathy, as an independent source of altruistic behaviour. Vicarious human emotions include fears and hopes, based on subtle cognitive capabilities of assessing the emotions of others in relation to their possible future states. This capability may have primarily evolved because such empathy facilitates the prediction of the behaviour of others and thus increases the quality of one's own strategic thought and thereby one's own fitness. A byproduct of such vicarious emotions, however, is a tendency to help and cooperate with others to improve their, and at the same time one's own, emotional state. In terms of neurobiology the capability of human empathy may have been initiated by the generalization of the capability of self-representation of possible future states of an individual towards the representation of others and the maintenance, or establishment, of linkages of their representations to the individual's own emotional centers. On the genetic level, this initiation may have occurred by duplications and new combinations of genomic DNA involved in high levels of the regulatory hierarchy, affecting wide prefrontal areas of the cortex and their connection with the limbic system. Immediate phenotypic consequences were probably very small but after initiation, evolution could proceed in the new direction, leading to full scale cognition-based empathy.

Our attempt to compare features of biological evolution with other fields of innovation, such as technology, is facilitated by a widely accepted definition of innovation in technology: It is not conceived as the creation of technological concepts and ideas in the mind but as their implementation in the market. With this definition, economic success of technological innovation is somewhat analogous to fitness for biological evolution, and the increase in market share of a novel technology is analogous to the increase of the population share of organisms with a novel genetically encoded feature.

The history of steam ships may serve as an example. The first economically successful steamship was FULTON'S »Clermont« in 1807. This innovation was followed by a slow, near-exponential growth of market share for many

decades at the expense of the share of sailing ships. In this case, nobody questions the importance of the initiation of the combination »ship« and »steam engine« at the beginning of the 19th century. Another intriguing technological example is that of electric networks capable of providing electricity, for virtually everybody, anywhere, for many purposes. It is this feature »generalization« that reminds us of the importance of generalizing capabilities in human brain evolution. In the case of electricity the rapid expansion of economically profitable electric networks was initiated in 1882 by EDISON's first supply system in New York's Pearl Street, specifically and simultaneously combining electric generators, networks for distribution, and the newly developed light bulbs. In the last three decades, the introduction of standardized containers guided by computerized logistics has caused a revolution of the distribution of goods in general, and of sea transportation in particular. The initiation by Sealand in the sixties was far from spectacular and not taken seriously by many observers, and yet it was this specific combination – metal boxes, logistics, ships – forming a system that led into the innovative major development of transportation.

Though there are many aspects that differ between biological and technological evolution, the founding of a new direction, in new dimensions of a fitness landscape, appears to be crucial in both domains. In particular, the importance of initiating events which are so evident in the history of technology may also be relevant for an understanding of the evolution of generalizing capabilities of the human brain. This is proposed to apply not only for language, mental self-representation and long-term strategic thought, but also for cognition-based empathy. This is not to claim that the history of technology may contribute directly to the theory of biological evolution. However, the history of science demonstrates that concepts and patterns of thought in one field can be helpful for the development of another.

Literatur

- ALBERTS, B., BRAY, D., LEWIS, L., RAFF, M., ROBERTS, K., and WATSON, J. D.: The Molecular Biology of the Cell. 3rd Edition. New York: Garland Publishing Inc. 1994
- ARNONE, M. I., and DAVIDSON, E. H.: The hardwiring of development: organization and function of genomic regulating systems. *Development* 124, 1851–1864 (1997)
- AXELROD, R., and HAMILTON, W. D.: The evolution of cooperation. *Science* 211, 1390–1396 (1981)
- CHAUVET, J. M., DESCHAMPS, E. B., und HILLAIRE, C.: Grotte Chauvet. Sigmaringen: Jan Torbeck 1995
- CHENEY, D. L., and SEYFAHRT, R. M.: How monkeys see the world. Chicago: University of Chicago Press 1990
- DAVIDSON, R. J., and SUTTON, S. K.: Affective neuroscience: The emergence of a discipline. *Current Opinion in Neurobiology* 5, 217–224 (1995)
- GIERER, A.: Relation between neurophysiological and mental states: Possible limits of decodability. *Naturwissenschaften* 70, 282–287 (1983)
- GIERER, A., and MÜLLER, C. M.: Development of layers, maps and modules. *Current Opinion in Neurobiology* 5, 91–97 (1995)
- HAMILTON, W. D.: The genetic evolution of social behaviour. *J. Theoret. Biol.* 7, 1–52 (1964)
- MAYNARD-SMITH, J.: Group selection and kin selection. *Nature* 201, 1145–1147 (1964)
- MARCHETTI, C.: The Future. In: CALGLIOTI, C., and HAKEN, H. (Eds.): Synergetics and Dynamic Instabilities; pp. 400–416. North Holland 1988
- MAYR, E.: Towards a new philosophy of biology; pp. 410ff. Cambridge (Mass.), London: Harvard University Press 1988
- POVINELLI, D. J., and PREUSS, T. M.: Theory of mind: Evolutionary history of a cognitive specialization. *Trends in Neuroscience* 8/9, 418–424 (1995)
- TRIVERS, R. L. (1971): The evolution of reciprocal altruism. *Quart. Rev. Biol.* 46, 35–57 (1971)
- DE WAAL, F.: Der gute Affe. Heidelberg: Hanser 1997

Prof. Dr. Alfred GIERER
Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie
Molekularbiologische Abteilung
Spemannstraße 35/IV
D-72076 Tübingen