

Nichtreduzierbare Komplexität

Reinhard Junker, Rosenbergweg 29, 72270 Baiersbronn (Stand: 29. 4. 2008)

Was ist nichtreduzierbare Komplexität?

Definition
 Das IC-Argument
 Funktionsfähige Vorstufen oder Einzelteile
 Basisfunktionszustände
 Kumulative Komplexität und IC-Kernbereich
 Zusammenfassung des IC-Arguments

Kritik

Kann die Mausefalle schrittweise entstehen?

Von redundanter zu nichtreduzierbarer Komplexität

Gedankenexperimente und theoretische Szenarien: Von einem nützlichen zu einem unentbehrlichem Teil
 Mit Hilfe eines Gerüsts zu IC?
 Fazit: Wie entsteht redundante Komplexität?

Multifunktionalität

Unrealistische Vereinfachungen

Computermodell

Genduplikation

Kooption und Funktionswechsel

Der TTSS-Apparat

Experimenteller Nachweis der Entstehung einer IC-Struktur?

Nachweis der evolutiven Entstehung einer IC-Struktur?
 Das Blutgerinnungssystem
 Knockout-Experimente
 Neue Substratspezifitäten
 Die Experimente von Bridgham et al.

Modularität und „exploratives Verhalten“

Mikroevolution und Systeme, die nicht IC sind

Sprunghafte Entstehung einer IC-Struktur?

Belousov-Zhabotinsky-Reaktion

Vergleichende Biologie als Argument

Schlussfolgerungen

Wissenschaftstheoretische Fragen

Ist das Kennzeichen „IC“ empirisch prüfbar?
 Ist IC widerlegbar?
 Beruht das IC-Argument auf Nichtwissen? Ist zu wenig über die Evolutionsfähigkeit bekannt?
 Kann für die Entstehung von IC-Strukturen ein Mechanismus angegeben werden?
 Kann bewiesen werden, dass IC nicht evolvierbar ist?
 Schließt der Nachweis von IC den Beweis von ID ein?
 Verhindert der Verweis auf IC Forschung?
 Erkenntniszuwachs und das IC-Argument: Fördert das IC-Konzept Forschung?
 Ist der Bezug auf einen Designer erlaubt?
 Schlussfolgerung: Wie kann die Evolvierbarkeit von IC bestätigt oder widerlegt werden?

Allgemeine Schlussfolgerungen

Anmerkungen

Quellen

Was ist nichtreduzierbare Komplexität?

In der Diskussion um „Intelligent Design“ (ID) spielt **nichtreduzierbare Komplexität („irreducible complexity“, IC)** molekularer Maschinen in den Zellen der Lebewesen eine besondere Rolle. Die Auffassung, viele Strukturen in der Organismenwelt seien nichtreduzierbar komplex, ist zwar in ihrem Grundgedanken keineswegs neu, wurde aber durch Michael BEHEs vielbeachtetes Buch „*Darwin's Black Box*“ (BEHE 1996/2006, deutsch 2007) einer breiteren Öffentlichkeit bekannt und ist aus der Diskussion um „ID“ nicht mehr wegzudenken.

Definition. Organismen bestehen aus zahlreichen synorganisierten Teilsystemen, d. h. es wirken viele Komponenten zusammen, um eine oder mehrere Aufgaben zu erfüllen. Dies ist besonders gut nachvollziehbar bei molekularen Maschinen, die Abläufe in den Zellen ausführen. Mindestens ein Kernbereich dieser Systeme scheint unverzichtbar für deren Funktion zu sein; er ist nichtreduzierbar. Entsprechend definiert BEHE nichtreduzierbare Komplexität wie folgt: „*A single system which is composed of several well-matched, interacting parts that contribute to the basic function, and where the removal of any one of the parts causes the system to effectively cease functioning*“ (BEHE 1996, 39). Später präziserte er diese Definition, indem er folgende Ergänzung einbrachte: „*A single system which is necessarily composed of several well-matched, interacting parts ...*“ (BEHE 2001, 694). Ein System ist demnach nichtreduzierbar komplex, wenn es notwendigerweise aus mehreren fein aufeinander abgestimmten, wechselwirkenden Teilen besteht, die für eine bestimmte Funktion benötigt werden, so dass die Entfernung eines *beliebigen* Teils die Funktion *restlos* zerstört. Ein solches System wird nachfolgend als **IC-System** bezeichnet. Wichtig in der Definition von IC ist, dass es sich um *wechselwirkende* Teile handelt, die *aufeinander abgestimmt* („well matched“) sind. In einer Antwort auf Kritiker hebt BEHE (2000a, 156) dies besonders hervor.

Das IC-Argument. In diesem Artikel wird vom IC-Argument die Rede sein. Es besagt, dass es nicht möglich ist, ein IC-System *kleinschrittig durch ungerichtete graduelle evolutive Prozesse* aufzubauen. Denn solange das System nicht alle für die Ausübung *der betreffenden Funktion* erforderlichen Teile besitzt, wäre es aufgrund seiner Funktionslosigkeit selektionsnegativ oder bestenfalls selektionsneutral (falls das System sehr einfach ist und seine Ausbildung daher nicht viel nutzlose Energie verschwenden würde). Das heißt: Nichtreduzierbar komplexe Systeme sind so gestaltet, dass die Selektion auf die betreffende Funktion hin erst greifen kann, wenn das System komplett vorliegt. *Das Argument der nichtreduzierbaren Komplexität berücksichtigt also ausdrücklich den Selektionsaspekt.*

Das IC-Argument ist „top-down“: Biologische Systeme werden zunächst auf das Kennzeichen „IC“ untersucht. Dann kann theoretisch modelliert werden, wie man ausgehend vom realen System durch Vereinfachungen des Systems oder auf anderem Wege zu Vorläuferstrukturen gelangen könnte, aus denen die IC-Struktur evolviert sein könnte, und es kann abgeschätzt werden, ob eine Entstehung durch ungerichtete evolutive Prozesse gangbar ist. Diese Betrachtung kann man durch einen „bottom-up“-Ansatz ergänzen: es wird experimentell geprüft, was Evolutionsmechanismen leisten, um sich „von unten“ IC-Strukturen anzunähern (diesen Ansatz verfolgt BEHE [2007] in seinem Buch „*The Edge of Evolution*“).

Als eingängiges Anschauungsbeispiel für nichtreduzierbare Komplexität verwendet BEHE die Mausefalle. Auf keines ihrer fünf Teile kann verzichtet werden, wenn ihre Funktion, Mäuse zu fangen, nicht *vollständig* verloren gehen soll. Die Entfernung *irgendeines* Teils zerstört die Funktion *restlos*. Außerdem müssen die Fallenteile auch zweckmäßig gestaltet sein. (Auf den Einwand, es gebe Mausefallen mit weniger als 5 Bauelementen, wird weiter unten eingegangen.)

Als reale biochemische Beispiele diskutiert BEHE in „*Darwin's Black Box*“ Cilien und die Bakteriengeißel, das Blutgerinnungssystem, den Transport durch die Zellmembran und das Immunsystem. FRANCIS (2000) diskutiert die bakterielle Zellteilung als IC-System. Beispiele für nichtreduzierbare Komplexität gibt es auch auf morphologisch-anatomischer Ebene, doch dürften hier die Verhältnisse viel zu komplex und zu wenig durchschaut sein, um *exakt* argumentieren zu können. Auf molekularer Ebene sind z. B. biochemische Maschinen vergleichsweise klar voneinander abgrenzbar. Daher spricht BEHE in der Definition von IC von einem „single system“ und es ist kein Zufall, dass das IC-Argument von BEHE im Bereich der Biochemie neu in die Diskussion gebracht wurde, wo es leichter ist, abgegrenzte Systeme auf IC zu überprüfen. Eine Makrostruktur wie z. B. eine Vogelfeder inklusive ihrer Verankerung besteht dagegen aus einer *Vielzahl* miteinander verknüpfter und wechselwirkender Einzelsysteme. Nichtreduzierbare Komplexität kann mit solchen Beispielen jedoch auch dem Nichtbiologen leicht veranschaulicht werden, auch wenn eine exakte biologische Argumentation hier nicht möglich ist.

Nichtreduzierbare Komplexität stellt ein schwerwiegendes Problem für die Vorstellung einer un gelenkten Evolution dar: Da Selektion *in Bezug auf eine neue Funktion* erst greifen kann, wenn eine wenigstens minimale neue Funktion vorliegt, stellt sich die Frage, wie eine IC-Struktur schrittweise evolutiv aufgebaut werden kann. Mögliche Vorstufen, die eine andere Funktion ausüben, wären auf die *erst noch zu erwerbende Funktion hin* nämlich nicht selektierbar, da sie *diese* Funktion noch nicht besitzen.

Funktionsfähige Vorstufen oder Einzelteile. Die Feststellung der Nichtreduzierbarkeit einer Struktur beinhaltet nicht, dass Teilstrukturen keine Funktion ha-

ben dürften. Einzelne Elemente des betrachteten IC-Systems, die manchmal als Vorstufen diskutiert werden, können eine *andere* Funktion als das System haben oder gehabt haben. Dies wurde von Kritikern des IC-Arguments in der Vergangenheit oft falsch verstanden. Jedoch weist BEHE (1996) ausdrücklich darauf hin, dass Einzelkomponenten durchaus funktionell sein können, und es ist verwunderlich, dass dies von Kritikern regelmäßig ignoriert wird. (Im Nachwort der Auflage von 2006 geht er erneut darauf ein und beklagt, dass einige Kritiker ihre private Definition von „IC“ formulieren, die nicht seiner eigenen entspricht, um darauf aufbauend ihre Kritik zu formulieren.¹) Da dieser Punkt sehr wichtig in der Diskussion um das IC-Argument ist, sei er anhand eines Beispiels einer *falschen* Wiedergabe von BEHEs Argument verdeutlicht. GUTMANN & WARNECKE (2006, 25) schreiben über das IC-Argument: „2. Die Einzelfunktionen der Komponenten dieser Systeme ergibt sich nur und *genau* aus der Gesamtfunktion der Systeme. 3. Diese Komponenten können nicht für sich allein funktionieren bzw. *haben* für sich allein keine Funktion.“ Richtig muss es hier heißen: „Die *Gesamtfunktion des Systems* ergibt sich nur und *genau* aus *der aufeinander abgestimmten Anordnung aller Teilsysteme und der Vollzähligkeit ihrer Komponenten*. Diese Komponenten können durchaus für sich allein funktionieren und können für sich allein eine Funktion haben, *die sich aber von der Funktion des Systems unterscheidet*.“² Funktionelle Einzelteile können jedoch insofern wichtig für die Beurteilung des IC-Arguments werden, als sie evolutive Vorstufen von IC-Strukturen sein könnten. Darauf wird später eingegangen.

Wie wird der Erwerb einer IC-Struktur auf evolutionärem Wege, d. h. durch ungerichtete Prozesse von Evolutionsbiologen erklärt? Wir werden verschiedene Lösungsvorschläge dazu diskutieren.

Basisfunktionszustände. Hypothetische Vorstufen einer IC-Struktur können, wie im vorangegangenen Abschnitt dargelegt, durchaus funktional sein und eine andere Funktion als das in Rede stehende IC-System ausüben. SCHERER (1983; 1995) hat für Vor- oder Zwischenstufen, die sich auf dem Weg zu einer IC-Struktur befinden könnten, den Begriff **Basisfunktionszustand** eingeführt (vgl. auch JUNKER & SCHERER 2006, 158). Es mag also Teilstrukturen geben, die funktionsfähig sind und die als Vorläuferstrukturen diskutabel sind und damit einen Basisfunktionszustand repräsentieren. Der Aufbau eines IC-System könnte daher auf mehrere Schritte verteilt werden (vgl. WASCHKE 2007, 98), von einem Basisfunktionszustand zum nächsten. Diese Schritte müssen genauer untersucht werden: wie groß sind die Abstände zwischen den Basisfunktionszuständen? Zu klären ist also, ob der Weg von einem Basisfunktionszustand zu einem anderen durch evolutionäre Mechanismen überbrückbar ist. Dazu ist eine eingehende Analyse des betreffenden Systems notwendig. So weisen FORREST & GROSS (2007, 305) darauf hin, dass es verschieden komplexe Blutgerinnungssysteme gibt, die allerdings nicht dieselben Funktionen ausüben. Hier

muss eine genaue Analyse der Unterschiede zwischen den Basisfunktionszuständen zeigen, ob diese durch bekannte evolutive Mechanismen überbrückt werden können. Dasselbe gilt für verschieden komplexe Cilientypen (MILLER 2000, 140ff.; Abb. 1). Dort lautet die entscheidende Frage: Wie entstand das *einfachste* Cilium? Vielleicht ist nur dieses nichtreduzierbar komplex. Unterschiedliche Cilientypen könnten darüber hinaus Basisfunktionszustände repräsentieren. Sind diese durch evolutive Prozesse überbrückbar? Verschiedene Cilien- oder Flagellentypen stellen das IC-Argument daher nicht in Frage. Hierzu wird im Abschnitt über den nichtreduzierbaren Kern der Strukturen genauer eingegangen.

Dass nichtreduzierbare Komplexität ein Problem für die Vorstellung einer graduell verlaufenden Evolution darstellt, war bereits Charles DARWIN bewusst. Er schrieb: „Wenn gezeigt werden könnte, dass irgendein komplexes Organ existiert, das nicht durch zahlreiche aufeinanderfolgende geringfügige Änderungen gebildet werden konnte, würde meine Theorie völlig zusammenbrechen“ (DARWIN 1859, Kapitel 6, S. 219f.; mit „meiner Theorie“ meint er die Selektionstheorie).³ Er fährt dann allerdings damit fort, dass er keinen solchen Fall finden könne. (Wir kommen im Abschnitt „Erkenntniszuwachs und das IC-Argument: Fördert das IC-Konzept Forschung?“ unter „Wissenschaftstheoretische Fragen“ darauf zurück.)

Damit ist klar, welche Bedeutung der Nachweis von Strukturen hätte, die nicht durch allmähliche Veränderungen entstehen können bzw. konnten: „Ein nichtreduzierbar komplexes biologisches System würde – wenn es denn so etwas gibt – eine gewaltige Herausforderung für die darwinistische Evolution darstellen“ (BEHE 1996, 39).⁴ Auch die ID-Kritiker THORNHILL & USSERY (2000, 112) stellen fest, dass *darwinistische* Evolutionsmechanismen für die Entstehung mancher IC-Struktur schwerlich in Frage kommen, diskutieren aber andere Möglichkeiten, auf die wir noch zu sprechen kommen werden. Ob eine *nicht-darwinistische, sprunghafte* oder sonst eine andere Entstehungsweise als Entstehungsweg in Frage kommt, wird weiter unten diskutiert.

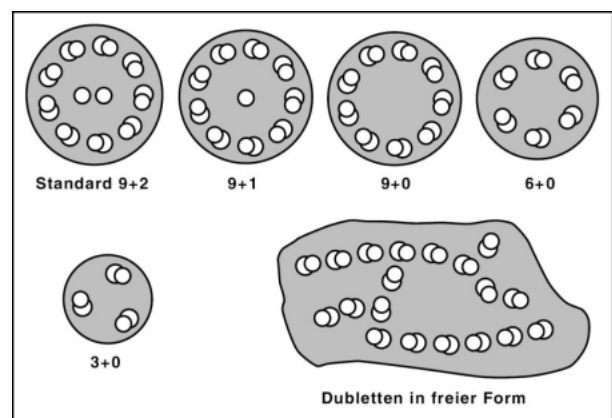


Abb. 1: Verschiedene Cilientypen von eukaryoten Zellen. (Nach MILLER 2000)

IC als Argument für ID? Nicht nur ein Scheitern der Erklärung von IC-Strukturen durch evolutive Mechanismen würde das IC-Argument stützen. Nichtreduzierbare Komplexität wird von vielen ID-Befürwortern darüber hinaus oft auch positiv als Argument für Design gewertet: Sie könne als *tertium comparationis* zwischen technischen und lebendigen Systemen dienen, so dass in einem Analogieschluss beim Nachweis von nichtreduzierbarer Komplexität auf das Wirken eines Urhebers geschlossen werden könne. Die Begründung für diesen Analogieschluss lautet: Wir *wissen*, wie nichtreduzierbare Komplexität entsteht: durch das Wirken eines Konstrukteurs, der seine unfertigen, im Aufbau befindlichen Konstruktionen nicht einer Selektion ausliefern muss. Eine vergleichbare Konstellation bei Lebewesen erlaube daher den Analogieschluss auf einen Urheber. DEMBSKI (2004, 16) argumentiert: „Es ist bekannt, dass Intelligenz nichtreduzierbar komplexe Systeme produzieren kann ... Man weiß also, dass Intelligenz eine angemessene Ursache ist, um nichtreduzierbare Komplexität hervorzubringen.“ Damit sei intelligent Design eine kausal angemessenere Erklärung als Darwinsche Mechanismen.⁵ Diese Argumentation soll im Abschnitt über wissenschaftstheoretische Fragen kritisch beleuchtet werden.

IC gilt für viele ID-Befürworter als starker Hinweis auf ID, weil hier Zielgerichtetheit besonders klar zum Ausdruck kommt: Das Zusammenwirken mehrerer Komponenten zum Erreichen eines Ziels, auf welches hin alle Teile zugeschnitten und fein aufeinander abgestimmt („well matched“) sind. Dies entspricht genau der Situation in der Technik und es wird ein Analogieschluss von der Technik auf die Natur gezogen. Die mit diesem Schlussverfahren verbundenen und andere Probleme des Design-Arguments werden an anderer Stelle diskutiert (JUNKER 2008); ich werde daher in diesem Artikel nur kurz auf den Analogieschluss eingehen.

Interessanterweise wird das IC-Argument auch von Evolutionstheoretikern benutzt, wenn sie begründen, weshalb es bestimmte Konstruktionen in der Natur *nicht* gibt (RAMMERSTORFER 2004). Beispielhaft ist folgende Aussage: „Viele gute Designs kann es in der evolutionären Landschaft nicht geben, weil sie *unüberbrückbare funktionelle Diskontinuitäten beinhalten*“ (VOGEL 2003, 15; Hervorhebung nicht im Original).⁶ DAWKINS und GOULD begründen das Fehlen von Rädern im Makrokosmos sinngemäß damit, „dass ein kurzsichtiger Evolutionsprozess Probleme mit Strukturen hat, für die keine Zwischenstufen denkbar sind“ (RAMMERSTORFER 2004). Das ist genau das IC-Argument. Es wird hier auf nichtexistente Strukturen angewendet. Mit derselben Logik gilt es aber auch für reale Strukturen.

Kumulative Komplexität und IC-Kernbereich.

Nichtreduzierbare Komplexität muss gegen „kumulative“ Komplexität abgegrenzt werden, also gegen eine Komplexität, die mit kleinen Schritten allmählich aufgebaut werden kann, so dass die schrittweise Entfernung einzelner Teile nie zu einem vollständigen Verlust der Funktion des Systems führt (DEMBSKI 1999, 147).⁷



Abb. 2: Drüsenhaare des Sonnentaus. (Foto: Richard WISKIN)

Wichtig ist auch noch folgendes: Eine Konstruktion mag *teilweise* reduzierbar sein, ohne dass ihre Funktion verloren geht. Anders ausgedrückt: Es ist denkbar, dass manche Konstruktionen aus einigen Teilen bestehen, die zwar nützlich, aber für die betreffende Funktion verzichtbar sind. Dies ist relativ leicht bei Makro-Strukturen Strukturen denkbar. So könnten beispielsweise die Fangblätter des Sonnentaus (Abb. 2) auch funktionieren, wenn die Drüsenhaare kein ausgeprägtes Köpfchen besitzen. Dagegen könnte auf die klebrige Verdauungsflüssigkeit zum Erhalt der Funktion nicht verzichtet werden. Es kommt also darauf an, herauszufinden, ob es eine nichtreduzierbare *Teilstruktur* gibt und *deren* IC zu begründen (DEMBSKI 2004).⁸ *Nur auf diesen IC-Kernbereich kommt es bei den Betrachtungen zu seiner Entstehung an.* Das IC-Argument greift für den unverzichtbaren Teil. Das Argument wird nicht dadurch entkräftet, dass man zeigt, dass ein kleiner Teil eines Systems reduzierbar ist.

Wie bereits weiter oben erwähnt, kann es Variationen von IC-Systemen geben; bekannt ist dies z. B. bei Flagellen (MILLER 2000, 142) und beim Bakterienmotor: „Yet ‘the’ bacterial flagellum does not exist“ (MUSGRAVE 2004, 72; vgl. PALLER & MATZKE 2006). Ein Vergleich der verschiedenen Variationen zeigt jedoch, dass *alle* Flagellen einen Mindestbestand an gleichen oder ähnlichen Bauelementen besitzen.⁹ Dabei könnte es sich um den IC-Kernbereich handeln und *darauf* bezieht sich das IC-Argument. Ein weiteres Beispiel könnte das Blutgerinnungssystem (eines der von BEHE [1996] behandelten Beispiele) sein, denn bei Delphinen fehlt ein Element dieses Systems, ohne dass es seine Funktion verliert (ROBINSON et al. 1969, MILLER 2004, 94). Damit ist das IC-Argument aber nicht widerlegt, denn es bleibt ein großer Teil des Systems, der IC sein könnte. (Aus den Ausführungen von MILLER [2004] geht übrigens nicht hervor, ob anstelle des fehlenden Faktors des Blutgerinnungssystems bei Delphinen ein anderer vorkommt. Wenn dem so sein sollte, wäre das Argument von MILLER nichtig).¹⁰

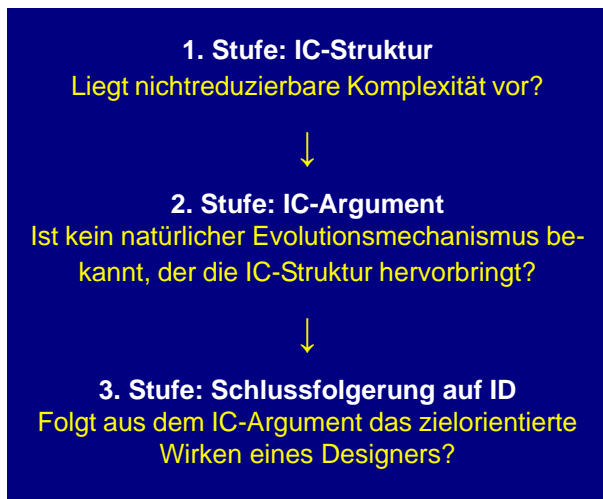


Abb. 3

Angesichts dieser Situation definiert DEMBSKI (2002, 285) den nichtreduzierbaren Kernbereich (irreducible core): Ein System mit einer Basisfunktion ist nichtreduzierbar komplex, wenn es aus einem Set fein abgestimmter, wechselwirkender Teile besteht, so dass jeder Teil für die Grundfunktion unverzichtbar ist.¹¹ Diesen Kernbereich gilt es herauszufinden und auf ihn ist das IC-Argument anzuwenden. SMART (2003) diskutiert Vorgehensweisen zur Bestimmung des Kernbereichs.

Es könnte sein, dass zunehmende Kenntnisse den IC-Kernbereich immer mehr verkleinern. Auf diesem Wege könnte das IC-Argument schließlich widerlegt werden (vgl. Abschnitt „Wissenschaftstheoretische Fragen“).

Die Argumentation mit IC ist kompliziert, da die Systeme der Lebewesen in der Regel ein gewisses Ausmaß an Redundanz besitzen. Wenn man versucht, einen IC-Kernbereich herauszuschälen, entfernt man sich von der realen Situation, so dass sich das IC-Argument auf eine hypothetische Vereinfachung bezieht. Auf die Redundanz in biologischen Systemen werden wir später zurückkommen.

Zusammenfassung des IC-Arguments und Ausblick. Organismen bestehen aus zahlreichen synorganisierten Teilsystemen. Diese besitzen häufig einen nichtreduzierbaren Kernbereich von mehreren, fein aufeinander abgestimmten Teilen. Das heißt: Die Entfernung eines beliebigen Teils zerstört die bisherige Funktion völlig. Bei der Entstehung einer IC-Struktur müssten also mehrere Teile gleichzeitig und aufeinander abgestimmt zusammengefügt worden sein. Darauf wird das IC-Argument aufgebaut: Der Vorgang der Entstehung einer IC-Struktur wird durch die bekannten ungerichteten evolutionären Prozesse nicht erklärt. Viele ID-Befürworter betrachten das IC-Argument auch als *positives* Argument für das Wirken eines Designers. Sie verweisen auf das Wissen um die ausschließlich planvolle Entstehung von IC im *technischen* Bereich und ziehen daraus einen Analogieschluss auf die Entstehung von IC bei Lebewesen.

Kritik an Argumentationen mittels IC kann an fol-

genden Punkten ansetzen, mit denen wir uns nachfolgend befassen werden (Abb. 3):

1. Gibt es überhaupt nichtreduzierbar komplexe Systeme?

2. Gibt es evolutive Wege der Entstehung nichtreduzierbar komplexer Systeme (sei es „klassisch darwinistisch“ oder auf einem anderen Wege)? Das heißt: Ist das IC-Argument haltbar?

3. Selbst wenn das IC-Argument gegen Kritik erfolgreich verteidigt werden kann: Folgt daraus ein Argument für ID?

„*Darwin's Black Box*“ erzielte große Beachtung und löste eine rege Diskussion aus. Kein Zweifel: Michael BEHE traf offenbar einen wunden Punkt der Evolutionsbiologie. Viele Kritiker räumten ein, dass *momentan* die Entstehungsweise komplexer biochemischer Systeme unbekannt sei¹² (BEHE 2001, 686), auch wenn sie die damit verbundenen evolutionstheoretischen Probleme für lösbar halten, ohne einen Designer annehmen zu müssen. Dass die Argumentation mit nichtreduzierbarer Komplexität evolutionäre Entstehungsszenarien in Frage stellt, wird an den Versuchen ersichtlich, auf nichtreduzierbarer Komplexität beruhende evolutionskritische Argumentation zu entkräften oder zu widerlegen. Auf diese Kritikpunkte kommen wir im folgenden zu sprechen.

Kritik

Die gegen das Konzept der nichtreduzierbaren Komplexität vorgebrachten Kritiken setzen an unterschiedlichen Stellen an (vgl. Abb. 3): Die Existenz von IC-Systemen wird bezweifelt, das IC-Argument in Frage gestellt und die Stringenz weitergehender Schlussfolgerungen auf ID bestritten. Bei manchen Einwänden handelt es sich um theoretische Betrachtungen oder Gedankenexperimente, einige Kritiker führen experimentelle Befunde an, wieder andere argumentieren wissenschaftstheoretisch. Selbst das Parade-Anschauungsbeispiel der Mausefalle wird als Beispiel für IC in Frage gestellt. Mit letzterem soll begonnen werden, da daran einige falsche Vorstellungen über das IC-Argument korrigiert werden können.

Kann die Mausefalle schrittweise entstehen?

Gegen die Existenz von nichtreduzierbarer Komplexität argumentiert McDONALD (2002; 2003), indem er BEHES Anschauungsbeispiel der Mausefalle zu widerlegen versucht (Abb. 4). Er zeigt, dass man Mausefallen mit weniger als fünf Teilen konstruieren kann; eine funktionsfähige Mausefalle kann sogar einteilig sein. Doch diese Mausefallen sind als physische Vorläufer der fünfteiligen Falle nicht geeignet. BEHE (2004, 365) weist darauf hin, dass er in „*Darwin's Black Box*“ zwischen einem *physischen* und einem *konzeptionellen* Vorläufer

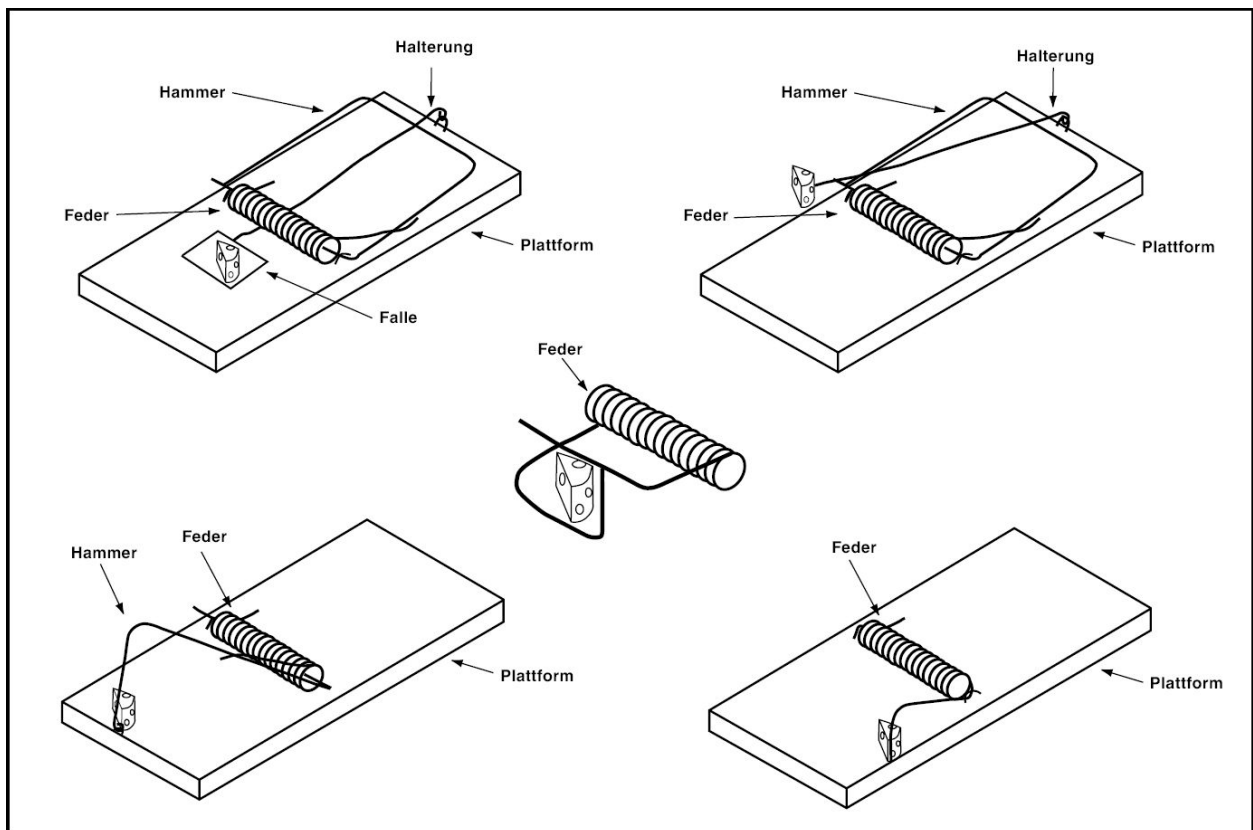


Abb. 4: Mausefallenserie nach McDONALD.

unterscheidet. Die Tatsache, dass Mausefallen unterschiedlich und mit einer verschiedenen Anzahl von Teilen konstruiert werden können, ist ohne Belang für die Frage, wie eine *bestimmte* nichtreduzierbare Falle entstanden ist. Die Frage ist vielmehr, wie eine erste funktionsfähige Falle entstanden ist und ob (bzw. wie) die einzelnen Fallen durch solche Mechanismen ineinander überführt werden können, die den bekannten Evolutionsmechanismen vergleichbar sind. McDONALD stellt diesen entscheidenden Punkt selbst heraus: „Sie sollen keine Analogie dafür darstellen, wie Evolution funktioniert“.¹³

Aber auch darüber hinaus wird durch diese Fallenserie das IC-Argument nicht hinterfragt. Zunächst ist nämlich die Ausgangsstruktur keine einfache Struktur, und sie ist durch Einsatz von Intelligenz entstanden. Zweitens sind Übergänge von einem Fallentyp zum nächsten nicht durch jeweils einzelne oder sehr wenige Zufallsschritte erreichbar. Vielmehr muss auch beim weiteren Umbau Intelligenz eingesetzt werden. Es wird nicht nur jeweils ein Teil hinzugefügt, sondern gleichzeitig *gezielt* umgebaut (vgl. DEMBSKI 2002, 261ff.). Die Fallenserie von McDONALD zeigt damit das Gegenteil von dem, was sie vorgibt: Ohne Intelligenz geht es nicht. BEHE (2004, 366) stellt daher zurecht fest: „... die Serie der Mausefallen von McDONALD eignet sich überhaupt nicht als Analogie für Darwinsche Evolution“,¹⁴ sie zeige geradezu das Gegenteil: die Umbauten in der Fallenserie benötigen den Einsatz von Intelligenz (vgl. auch BEHE 2000c, wo dies im einzelnen erläutert wird).¹⁵

Den Vergleich mit der Mausefalle sollte man nicht überbewerten. Er soll das Kennzeichen der nichtredu-

zierbaren Komplexität anschaulich machen; nicht mehr und nicht weniger. Relevant ist dagegen die Kritik, dass die Konstruktionen der Lebewesen nur teilweise mit Mausefallen zu vergleichen sind. Ein wichtiger Unterschied ist die viel komplexere Vernetzung der „Einzelbausteine“ bzw. der entsprechenden Gene, die oft mehrere Funktionen gleichzeitig ausüben. Das macht die Argumentation mit IC bei den Lebewesen kompliziert, wie nachfolgend an den weiteren Kritikpunkten deutlich werden wird, die zum IC-Argument geäußert wurden.

Von redundanter zu nichtreduzierbarer Komplexität

Konstruktionen der Lebewesen besitzen Eigenschaften, die eine Mausefalle und andere technische Konstruktionen nicht aufweisen. Eines dieser Kennzeichen ist besondere Art der Redundanz (s. u.; vgl. z. B. SHANKS & JOPLIN 1999¹⁶). Wie schon erläutert, sind reale biologische Systeme nicht strikt nichtreduzierbar, sondern es muss gezeigt werden, dass es einen nichtreduzierbaren Kernbereich eines teilweise redundant-komplexen Systems gibt. Hilft aber die Tatsache, dass biologische Systeme eine redundante Komplexität besitzen, in der Frage nach der Entstehung von IC weiter? Könnte nichtreduzierbare Komplexität durch Eliminierung redundanter Komplexität entstanden sein (THORNHILL & USSERY 2000, 113; DUNKELBERG 2003)? Dazu werden im folgenden einige Überlegungen vorgestellt und kritisch beleuchtet.

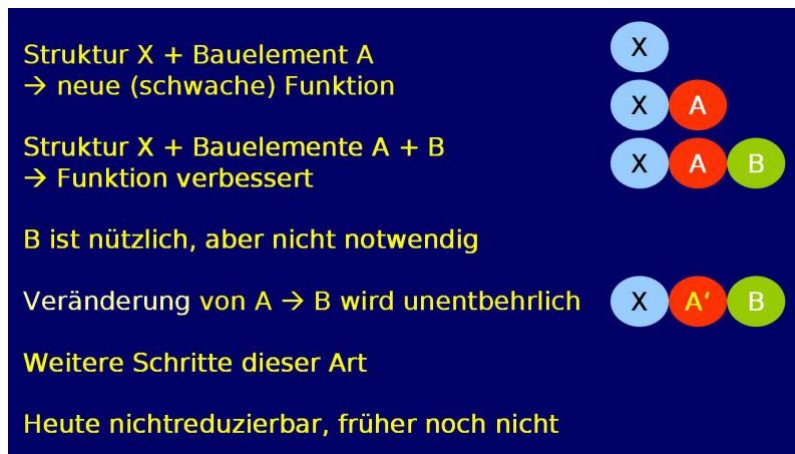


Abb. 5: Von einem nützlichen zu einem unentbehrlichen Element.

Gedankenexperimente und theoretische Szenarien: Von einem nützlichen zu einem unentbehrlichen Teil. ORR (1996/1997; 2005) versucht das IC-Argument durch folgendes Gedankenexperiment zu widerlegen (vgl. Abb. 5): Eine Struktur erhalte durch Einbau eines neuen Bauelements A eine neue Funktion, die jedoch noch nicht gut ausgeübt wird. Später kommt ein weiteres Element B hinzu, durch welches die Funktion von A verbessert wird. B ist also zu diesem Zeitpunkt noch nicht unbedingt erforderlich, aber nützlich. Durch spätere Veränderung von A oder anderen schon vorhandenen Bauteilen wird B aber unentbehrlich. In dieser Weise könnten weitere Teile eingebaut und sukzessive absolut notwendig werden; das System wird also nichtreduzierbar. GENE (2007, 219f.) bezeichnet diesen Entstehungsweg als „Original Helping Activity“, DEMBSKI (2002, 256) als „Incremental Indispensability“.

ORR (2005) bringt ein Beispiel dieser Art aus der Computerwelt und als weiteres Beispiel das Wachsen einer Einkaufszone einer Großstadt. Als biologisches Beispiel nennt ORR die Umwandlung der Schwimmblase in die Lunge. Ursprünglich war der Besitz einer Lunge (bei Fischen) nur nützlich (weil er die Eroberung eines neuen Lebensraums ermöglichte), nicht aber wirklich notwendig. Nach dem Erwerb von Beinen und dem Verlassen des Wassers wurde die Lunge dann aber unentbehrlich. ORR (1996/1997) resümiert: „Obwohl dieser Vorgang durch und durch darwinistisch ist, erhalten wir als Ergebnis oft ein nichtreduzierbar komplexes System.“¹⁷

Auch FORREST & GROSS (2007, 303) und THEOBALD (2007) argumentieren so und machen darauf aufmerksam, dass bereits 1939 H. J. MULLER eine evolutive Sequenz von einem nützlichen zu unentbehrlichen Bestandteil eines Systems vorgeschlagen hat, wie auch ORR dies beschreibt.¹⁸ FORREST & GROSS (2007, 303) verdeutlichen diesen hypothetischen Vorgang durch Abb. 6 und folgern: „Es gibt daher völlig plausible Prozesse, die seit langem in der Genetik bekannt sind, durch die kleine und allmähliche Änderungen dazu führen können, dass ein anfangs einfaches funktionales System in seiner Komplexität zunimmt und an einem bestimmten Punkt ‚nichtreduzierbar‘ wird.“¹⁹

Kritik. Diese Argumentation ist in mehrfacher Hinsicht fragwürdig. Das Gedankenexperiment können wir im Grunde genommen beiseite lassen, denn wenn es darum geht, einen Mechanismus zur Entstehung einer IC-Struktur von Lebewesen aufzuzeigen, müssen *biologische* Befunde vorgelegt werden (s. u.). Es trifft zudem das IC-Argument gar nicht, da in diesem Gedankenexperiment eine neue Funktion bereits durch *ein einziges* neues Element erworben und durch später hinzukommende Teile nur noch verstärkt bzw. verbessert wird. Das entspricht gerade nicht der Konstellation von IC-

Strukturen. Das Gedankenexperiment ist also grundsätzlich verfehlt. Die Frage ist, ob die biologische Realität diesem Gedankenexperiment entspricht.

Der Vergleich mit der Entwicklung von Computern und Stadtzentren geht ebenfalls am IC-Argument vorbei. Denn zum einen handelt es sich nicht um Einzelsysteme im Sinne von BEHE. Stadtzentren sind nicht mit biochemischen Systemen, die eine Funktion ausüben, vergleichbar. Zum anderen entsprechen die Vorgänge überhaupt nicht Darwinschen Prozessen, denn es wird gezielt *Know how* investiert; diese Vergleiche liefern folglich keine Argumente gegen ID. Es müsste auch hier gezeigt werden, dass diese als Vergleich herangezogenen Prozesse in vergleichbarer Weise *in Lebewesen* funktionieren (vgl. DEMBSKI 2005). Zudem handelt es sich offenkundig um Beispiele einer *kumulativen* Komplexität (s. o.).²⁰ Diese Einwände gelten auch für Vergleiche mit dem Wirtschaftsleben, die SHANKS & JOPLIN (2001) heranziehen. Diese beiden Autoren fragen, wie ein komplexes System wie die Wirtschaftswelt mit ihren zahlreichen wechselwirkenden Teilen, Stabilität und Ordnung aufrechterhalten kann. Die Antwort muss lauten: In diesem komplexen System steckt im Einzelnen viel Planung und Lenkung, auch wenn es keine übergeordnete Planung für das Gesamtsystem gibt. Die Autoren meinen, wirtschaftliche Ordnung entstehe als unbeabsichtigte, nicht geplante Folge der Handlung („operation“) einer unsichtbaren Hand. Der Begriff „operation“ verrät jedoch die Notwendigkeit von Aktionen, die in lebenden Systemen nicht vorausgesetzt werden kann.

Auch Abb. 6 von FORREST & GROSS (2007) geht am Problem vorbei. Der linke Teil soll eine biochemische Maschine darstellen, die aus vielen essentiellen Teilen besteht (dargestellt durch Sechsecke). Die Autoren behaupten nun, dass nach dem IC-Argument die Einzelteile keine Funktion hätten, weder gegenwärtig noch in der Vergangenheit (S. 304).²¹ Das ist falsch, denn diese Möglichkeit schließt BEHE ausdrücklich in seiner Argumentation ein (worauf oben schon hingewiesen wurde). Im rechten Teil der Abbildung wird dargestellt, dass Einzelteile eine *andere* Funktion als das System haben können. Die weitere Behauptung von FORREST & GROSS ist durch experimentelle Daten nicht gedeckt: „Daher können IC-Maschinen durch Zusammenlage-

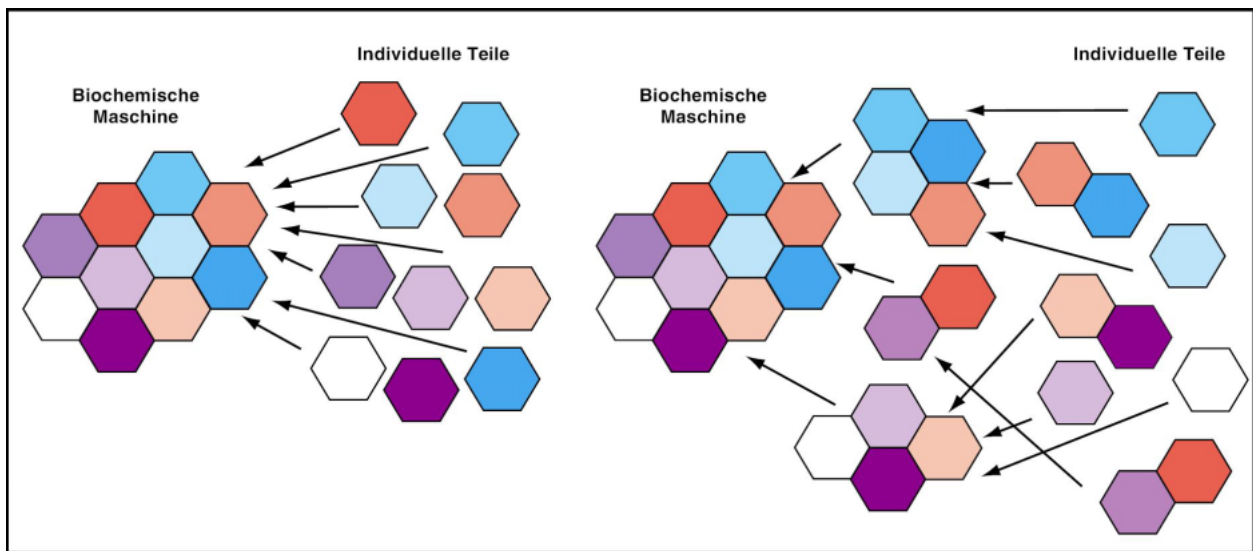


Abb. 6: Kooptionsmodell nach FORREST & GROSS (2007)

rung schrittweise auf darwinistische Weise evolvieren und sie tun dies auch. Ihre einzelnen Komponenten sind selektierbar, bevor sie sich zur Maschine zusammenlagern“ (S. 304).²² Genau das ist erst noch zu zeigen: Wie werden durch Darwinsche Mechanismen Bauelemente zusammengefügt, so dass die neue Einheit eine neue Funktion ausübt? FORREST & GROSS (2007) bringen in ihrem Artikel für diesen hypothetischen Vorgang keine konkreten Beispiele.

Analysieren wir nun das Anwendungsbeispiel des Gedankenexperiments von ORR (Schwimmbase / Lunge / Fortbewegung). Der Hauptkritikpunkt: Dieses Beispiel trifft das IC-Argument gar nicht. Denn bei der IC-Argumentation geht es laut Definition von BEHE (1996, 39) um *ein bestimmtes* System („a single system“), nicht um einen ganzen Komplex von Systemen (Atmung/ Fortbewegung und weitere Körperteile, die ihrerseits aus zahlreichen Subsystemen bestehen). Nicht einmal die Schwimmbase bzw. die Lunge stellt ein einzelnes System dar, da das Lungengewebe seinerseits nichtreduzierbare Untersysteme wie z. B. Cilien enthält. Anders gesagt: Die Betrachtung eines Systems muss auf die Ebene nicht mehr reduzierbarer Teilsysteme hinunterkommen; erst dann setzt die IC-Argumentation an. Wie bereits erwähnt, sind auf höherer Systemebene die Bauelemente, ihre Verflechtungen und Funktionen im Detail bislang viel zu wenig bekannt, um exakte Aussagen über Nichtreduzierbarkeit machen zu können. (Man kann vermuten, dass die IC-Problematik auf dieser Ebene dieselbe ist, doch ist dies derzeit wegen zu geringer Kenntnisse noch nicht genauer erforschbar.) Im Zeitalter der Molekularbiologie ist es möglich geworden, *vergleichsweise* einfache molekulare Systeme zu erforschen und damit erst Hypothesen von IC genauer zu testen.

Die weitere Einbeziehung der Fortbewegungsweise durch ORR führt die Argumentation vollends vom Thema IC weg. Denn bei IC geht es darum, ob ein *bestimmtes, abgegrenztes* System seine Funktion komplett verliert, wenn ein *beliebiges* Element entfernt wird. Die Betrachtung müsste sich also auf die Lunge be-

schränken, was aber aus den im vorigen Abschnitt genannten Gründen immer noch viel zu grob wäre. Auch wenn es banal klingt: Die Funktion der Lunge wird durch die Entfernung eines Beines nicht beeinträchtigt. ORR hat offenbar den ganzen Organismus im Blick (er schreibt: „... if you remove this part, the organism will eventually die“). Das IC-Argument bezieht sich aber nicht auf ganze Organismen. Das Beispiel von ORR ist also völlig untauglich; es eignet sich eher zur Illustration, wie das IC-Argument *nicht* gemeint ist.²³

Darüber hinaus muss noch – abgesehen von der IC-Problematik – angemerkt werden, dass es keineswegs klar ist, dass Schwimmbase, Lunge oder Beine durch Darwinsche Mechanismen entstanden sind, wie ORR einfach behauptet („although this process is thoroughly Darwinian“). Dieser Nachweis ist bisher nicht erbracht worden.

Ähnliche Kritik gilt auch dem Beispiel verschiedener Blutkreislaufsysteme, welches BEYER (2005) diskutiert, um die Möglichkeit eines schrittweisen Aufbaus einer IC-Struktur zu begründen. Auch hier ist die Betrachtung viel zu grob, weil die verglichenen Strukturen aus vielen Subsystemen zusammengesetzt sind, so dass das IC-Argument nicht auf die Blutkreislaufsysteme anwendbar ist. Außerdem ist der Nachweis, dass die Übergänge zwischen den einzelnen Systemen durch die bekannten Evolutionsmechanismen erklärbar sind, nicht erbracht worden. Auch DUNKELBERG (2003) verfehlt aus denselben Gründen das Thema, wenn er Beine oder das Verdauungssystem als Beispiele für IC anführt.²⁴

GENE (2007, 200) schließlich kritisiert die Hypothese von der „Original Helping Activity“ (s. o.) mit der Feststellung, dass bereits von einem nichtreduzierbar komplexen System mit einer bestimmten Funktion ausgegangen werde, die durch Hinzunahme eines weiteren nützlichen Elements nur *verbessert* werde. Der Ursprung des Systems werde dadurch aber nicht erklärt.

Mit Hilfe eines Gerüsts zu IC? Einen ähnlichen Einwand gegen das IC-Argument formuliert WASCHKE

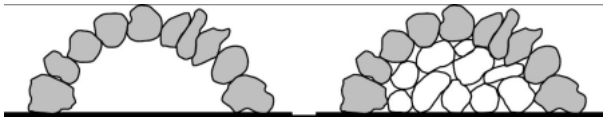


Abb. 7: Mit Hilfe eines Gerüsts zu IC (nach KORTHOF).

(2003): „Auch wenn die derzeitige Struktur nichtreduzierbar komplex ist, bedeutet das noch lange nicht, dass nicht ein weniger weit entwickelter Vorläufer vorhanden war, der redundante Komponenten enthielt. Diese Struktur wurde dann durch Mutation und Selektion ‘feingetuned’, und erst das Ergebnis dieser Optimierung ist dann nichtreduzierbar komplex.“ Dieser Weg von einer redundanten zu einer nichtreduzierbaren Komplexität zu gelangen wird häufig mit dem Aufbau unter Zuhilfenahme eines Gerüsts verglichen. Ein beliebte Veranschaulichung ist ein Torbogen, der dadurch entsteht, dass man einen Steinhaufen bildet, mit dessen Hilfe ein Bogen gebildet wird, um in einem weiteren Schritt die entbehrlich werdenden Steine wieder zu entfernen (siehe dazu z. B. THORNHILL & USSERY 2000, 113; SCHNEIDER 2000; RUSE 2005²⁵; KORTHOF 2007; Abb. 7). Der Steinhaufen ist noch redundant komplex; das Ergebnis, der Bogen ist dann nichtreduzierbar komplex, da auf keinen Stein mehr verzichtet werden kann.

Der Vergleich mit Steinhaufen und Torbogen kann jedoch nur als missglückt bezeichnet werden. Es stellen sich nämlich folgende Fragen: Allem voran: Welches sind die biologischen Beispiele, die mit dem Steinhaufen-Torbogen-Szenario verglichen werden können? Worauf wurde anfangs selektiert? Wodurch änderte sich das Selektionsziel, nachdem der Steinhaufen groß genug war, um einen Torbogen daraus zu machen? Diesen Fragen muss man bei realen biologischen Beispielen nachgehen.²⁶ Ein Gerüst wird zudem nur dann aufgestellt, wenn man ein bestimmtes Ziel verfolgt. Ein Aufbau mit Hilfe eines Gerüsts ist also eine „ID-Methode“.²⁷ Um diesen Schluss zu vermeiden, müsste das Gerüst als ungeplantes Nebenprodukt der Selektion auf eine andere Funktion hin entstehen. Hier stellt sich die schon angemahnte Frage nach konkreten biologischen Beispielen.

KORTHOF (2007) wirft noch die Frage auf, ob ein redundantes, fehlertolerantes System nicht intelligenter sei als ein nichtreduzierbares System ohne Redundanzen, das leicht durch Mutationen zerstört werden könne. Beides zugleich könne man nicht haben.²⁸ KORTHOF hat recht: Ein fehlertolerantes System ist intelligenter. Aber die Frage ist doch: wie entsteht Fehlertoleranz durch zukunftsblinde Evolutionsmechanismen? Und auch ein redundantes System kann einen nichtreduzierbaren Kernbereich besitzen (s. o.). Redundante und nichtreduzierbare Komplexität können auf diese Weise zugleich verwirklicht sein.

Gerüstbau gibt es tatsächlich in der Ontogenese. „Man weiß heute aus der molekularen Embryologie, dass viele Strukturen unter Zuhilfenahme von Komponenten entstehen, die nach dem Entstehen der Struktur genetisch programmiert wieder abgebaut werden – analog zu den hölzernen Stützgerüsten, mit deren Hilfe

die gewaltigen Kuppeln barocker Dome gebaut wurden“ (MARKL 2007, 51). Doch dies ist kein Modell für die Phylogenese, weil sowohl die Rahmenbedingungen als auch die Mechanismen nicht im Entferntesten vergleichbar sind.

Die Idee des Gerüstbaus erweist sich als eine vage, allgemein gehaltene und untaugliche Spekulation, für die es nach derzeitigem Kenntnisstand keine konkreten, empirisch belegten Hinweise aus der biologischen Realität gibt. Ohne konkrete Beispiele kann die Erklärungskraft dieses spekulativen Szenarios nicht beurteilt werden. „Das Fehlen detaillierter Modelle in der biologischen Literatur, die Gerüstbau anwenden, um nichtreduzierbar komplexe biochemische Systeme zu erzeugen, ist daher ein Grund, bezüglich solcher Modelle skeptisch zu sein“ (DEMBSKI 2002, 254).²⁹

Fazit: Wie entsteht redundante Komplexität?

SHANKS & JOPLIN (1999, 277) weisen darauf hin, dass Knockout-Experimente bei biochemischen Abläufen gezeigt haben, dass ausgefallene Funktionen durch Ersatzenzyme übernommen werden. Es sei typisch für evolvierte biochemische Systeme, dass es mehrere Wege zur Ausübung einer Funktion gibt, so dass bei einem Ausfall ein anderer einspringen könne.³⁰ Allerdings sind Redundanzen nicht einfach darzustellen: Es ist nicht so, dass für eine bestimmte Funktion zwei Gene zur Verfügung stehen, die sich gegenseitig vertreten könnten und genau dieselbe Funktion haben. Die Redundanzen sind vielmehr überlappend. Das heißt: Gene, die sich gegenseitig vertreten können, haben mehrere Funktionen, die sich von Gen zu Gen aber unterscheiden (Näheres dazu bei TAUTZ 1992). Die Thematik kann hier nicht vertieft werden, doch stellen sich in Bezug auf das IC-Argument angesichts solcher Befunde folgende Fragen: Wie entsteht redundante Komplexität? Wie sind redundant-komplexe System erstmals etabliert worden? Wir haben zudem im vorigen Abschnitt gezeigt, dass Redundanz nicht als Gegensatz zu IC gesehen werden kann: Redundante Systeme dürften einen IC-Kernbereich haben. SHANKS & JOPLIN (1999, 281) schließen ihren Artikel mit der Vermutung: „Vielleicht möchte Behe argumentieren, dass diese ausgeklügelten Produkte mit ihren redundanten Backup-Systemen eine noch anspruchsvollere Design-Metapher darstellen, um die Natur in Begriffe zu kleiden.“ Damit dürften sie recht haben, die Autoren sind aber der Auffassung, „dass naturalistische evolutionäre Prozesse bekanntermaßen ähnliche Redundanzen hervorbringen.“³¹ Doch sie beschreiben nicht, wie das geht.

Multifunktionalität

MUSGRAVE (2004, 73) wirft DEMBSKI vor, er vergrößere das Problem der Evolution des Flagellums künstlich und in irreführender Weise, da er das Flagellum als isolierten Außenbordmotor betrachte. In Wirklichkeit sei es ein multifunktionales Organell, für das keine Analog aus der Technik gebe.³² Aus dieser richtigen

Feststellung kann aber kaum ein evolutionstheoretisches Argument abgeleitet werden. Eine Erklärung einer evolutiven Entstehung wird dadurch eher schwieriger. Denn Multifunktionalität *erschwert* eine evolutive Entstehung, da Änderungen gleichzeitig mehrere Auswirkungen haben können und somit höhere Anforderungen an selektionspositive Mutationen gestellt werden. Aus diesem Grund ist in der Evo-Devo-Forschung Modularität ein wichtiger Aspekt lebendiger Konstruktionen, weil dadurch Evolution *erleichtert* wird, dass die Verflechtungen nicht zu ausgeprägt sind.

Die Analogie zwischen Bakterienmotor und technischen Motoren ist in der Tat nur teilweise gegeben; der Analogieschluss bezieht sich aber auf das offenkundig Gemeinsame; dazu wird an anderer Stelle ausführlich eingegangen (JUNKER 2008).

Ähnlich wie MUSGRAVE argumentieren FORREST & GROSS (2007, 304), dass es im Erbgut eine „dichte Pleiotropie“ gebe, besonders bei Regulationsgenen; einzelne Gene werden in verschiedenen Funktionszusammenhängen verwendet.³³ Diese Vernetzung macht das zu lösende evolutionstheoretische Problem nicht einfacher – im Gegenteil. Im übrigen stellt BEHE diese Vernetzung nirgends in Abrede. Die Beschränkung auf ein möglichst überschaubares einzelnes System („single system“) dient nur der leichteren Handhabbarkeit des Problems.

Unrealistische Vereinfachungen

Die Kraft des IC-Arguments wird durch eine oberflächliche Analyse einzelner Beispiele in Frage in Frage gestellt. Ein Paradebeispiel dafür ist das Linsenauge, das im Zusammenhang mit dem IC-Argument oft als Beispiel angeführt wird. Kritiker behaupten, es gebe eine Folge kleiner selektierbarer Schritte vom einfachsten Flachauge bis zum komplexen Linsenauge. BEHE weist aber schon in „*Darwin's Black Box*“ darauf hin, dass man genauer hinsehen muss. Dann werde deutlich, dass es sich keineswegs um kleine Schritte handelt: „Man muss bedenken, dass der lichtempfindliche Fleck, welchen Dawkins als seinen Startpunkt zugrundelegt, eine Kaskade von Faktoren benötigt ..., damit er funktioniert“ (BEHE 1996, 38).³⁴ Ebenso ist beispielsweise die Entwicklung einer „einfachen Linse“ keine simple Angelegenheit. Das Ausmaß an Veränderungen und Erfindungen, die von Stufe zu Stufe erforderlich sind, wird in vereinfachten Darstellungen überspielt. Dies wird in ULLRICH et al. (2006) näher erläutert. Zudem gehen Modelle zur Entstehung des Linsenauges von biologisch unrealistischen Annahmen aus (HANSEN 2003).³⁵

Viele Kritiken des IC-Arguments bleiben auf der Ebene allgemeiner, unpräziser und unkonkreter Betrachtungen (BEHE 2006, 265ff.). BEHE weist verschiedentlich darauf hin, dass es mit oberflächlichen Statements nicht getan ist, wenn man den Anspruch erhebt, die Entstehung einer IC-Struktur evolutiv zu erklären; dazu muss ins Detail gegangen werden. Ein Beispiel dafür ist der Satz „Es macht evolutionär Sinn, dass der Cytochrom

bc1- und der Cytochrom *c*-Oxidase-Komplex aus einem primitiven Quinol-Oxidase-Komplex durch eine Serie vorteilhafter Mutationen entstanden sind“ (zit. in BEHE 2002).³⁶ Dass es eine solche Serie vorteilhafter Mutationen gebe, ist eine bloße Behauptung; hier muss gezeigt werden, wie diese Serie aussehen könnte, damit sie sukzessive durch natürliche Selektion aufgebaut werden kann.

Computermodell

Die Informatikerin Suzanne SADEDIN (Monash University, Australien) will mit einem einfachen Computermodell die schrittweise evolutive Entstehung einer nichtreduzierbar komplexen Struktur demonstrieren, die BEHEs Definition erfüllen soll (SADEDIN 2006).

Es handelt sich um ein einfaches geometrisches Modell eines zweidimensionalen, durch Aufteilung einer Fläche in Dreiecke entstandenen Gitters (Abb. 8). Die Knoten (Eckpunkte der Dreiecke) können im EIN- oder AUS-Zustand

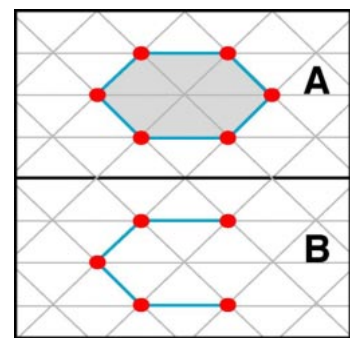


Abb. 8 (nach SADEDIN)

sein. Stehen zwei benachbarte Knoten auf EIN, bildet sich eine Verbindung zwischen ihnen. Schließen mehrere Knoten mit ihren Verbindungen eine Fläche ein, so wird von dieser Figur angenommen, sie habe eine Funktion. Offene Figuren hingegen seien funktionslos (Abb. 8). Wird also aus der geschlossenen Figur ein Element entfernt, geht folglich die „Funktion“ verloren.

Ein solch einfaches System kann problemlos sukzessive durch Mutation und Selektion aufgebaut werden. Mutiert ein AUS-Knoten in den EIN-Zustand, so wird das Ergebnis der Mutation selektiert, wenn der Knoten einer geschlossenen Figur benachbart ist (dann bleibt die „Funktion“ „Geschlossen sein“ nämlich erhalten, s. Abb. 9A-E). Größere Systeme sollen selektiv im Vorteil gegenüber kleineren sein. Nun können ab einer bestimmten Größe solche Knoten, die sich in der Mitte befinden, auf AUS mutieren, ohne dass die Funktion verloren geht (Redundanz!), und es kann so ein nichtreduzierbarer Zustand erreicht werden: Jetzt darf kein Knoten mehr auf AUS mutieren, ohne dass die „Funktion“ verloren geht. Auch die Entfernung redundant gewordener EIN-Knoten soll selektiv begünstigt sein (Abb. 9F; gleiche Größe mit weniger Knoten).

Kritik.³⁷ Ist dieses Modell geeignet, die Entstehung nichtreduzierbarer Komplexität *in der Biochemie* zu simulieren? Den biochemischen Systemen, anhand derer BEHE seine Behauptungen illustriert und belegt, wird der Ansatz von SADEDIN nicht annähernd gerecht, und zwar aus folgenden Gründen:

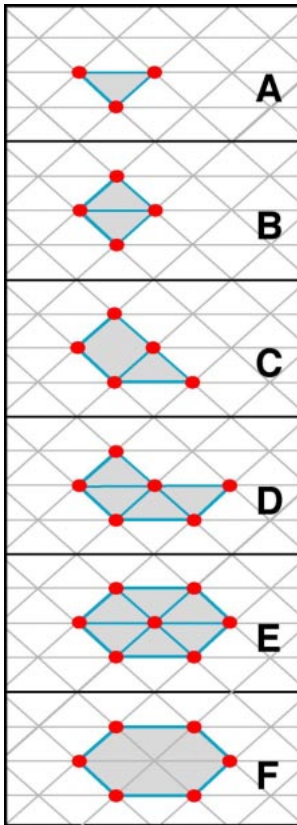


Abb. 9 (nach SADEDIN)

- Die Punkte sollen für Teile eines IC-Systems stehen, also z. B. für Proteine. Deren Interaktion wird durch die Verbindungen angezeigt. Da SADEDIN mit einem Dreieck beginnt, steht am Anfang bereits ein IC-System: drei interagierende Teile ohne redundante Knoten. Es wird also gar nicht modelliert, wie IC erstmals entsteht. Um diesen Anfang zu modellieren, müsste im Modell die betrachtete Fläche sehr viel größer gewählt werden, um im Vergleich zur Komplexität biochemischer Prozesse (z. B. immenser Sequenzraum von Proteinen) realistisch zu sein. Wählt man die Gitterfläche in angemessener Größe, dann wird der *Ausgangszustand* (Abb. 9A, also drei benachbarte Punkte) nur

sehr schwer erreicht. Außerdem würden sich dann auch verwertbare Mutationen zu selten ereignen, so dass das Modell didaktisch nicht mehr brauchbar wäre.

- Es fehlt der Nachweis, dass das Computermodell mit einem funktionalen System eines Lebewesens vergleichbar ist. Die EIN-Knoten im Gitter werden mit funktionalen Proteinen gleichgesetzt. Dies geht aus folgendem Zitat hervor: „Sogar in dieser kurzen Zeit erreichten die evolvierten Systeme ein Ausmaß an Komplexität, das den Systemen vergleichbar ist, die üblicherweise als Beispiele nichtreduzierbarer Komplexität zitiert werden. Nichtreduzierbare Systeme, die durch dieses Modell erzeugt wurden, enthielten zwischen 6 und 30 Teile; das Bakterienflagellum benötigt etwa 33 Teile ...“³⁸ Diese Gleichsetzung ist ausgesprochen unsachgemäß, da die Entstehung neuer funktionaler Proteine oder deren Einbau in ein System nicht mit einem einzigen Schritt (wie im Modell von SADEDIN) möglich ist. In der Natur haben die Komponenten des Systems weitaus mehr Eigenschaften als nur „EIN“ und „AUS“: Die Teile (Knoten) müssen fein aufeinander abgestimmt sein, damit sie zusammenwirken können (siehe BEHES Definition). In SADEDINS Modell gehen die Knoten automatisch Verbindungen zu benachbarten Knoten ein. Das ist in biologischen Systemen unrealistisch. Denn in der Natur bilden sich solche Interaktionen nicht automatisch, sondern erfordern eine Anpassung der beteiligten Komponenten des Systems (vgl. Abschnitt „Kooptation und Funktionswandel“). Mit einer einzigen Punktmutation, wie es SADEDINS Modell beinhaltet, ist es bei weitem nicht getan. SADEDIN diskutiert die Vergleichbarkeit dessen, was modelliert wer-

den soll, dagegen nicht einmal. Der im obigen Zitat getroffene Vergleich der Verbindungen von EIN-Knoten mit der Bakteriengeißel demonstriert die Irrelevanz der Computersimulation für die Entstehung biochemischer Apparate.

- Größere Systeme sollen selektiv im Vorteil gegenüber kleineren sein (s. o.). Auch hier stellt sich die Frage nach der Entsprechung zu biochemischen Systemen.

- Ferner kann jeder Knoten in dem Modell nur zwei bis sechs Verbindungen zu anderen Knoten eingehen – bei IC-Systemen sind es im Modell genau zwei Verbindungen bei jedem Knoten. Das ist erneut unrealistisch gemessen an biologischen Systemen. Um noch mehr Interaktionen der Teilsysteme zuzulassen, müsste das Modell auf höherdimensionale Räume zu erweitert werden und wäre bald nicht mehr „einfach“.

- In SADEDINS Modell gehen die Knoten nicht nur automatisch Verbindungen ein, sondern die Verbindungen werden auch automatisch gekappt, wenn z. B. ein redundanter Knoten durch Mutation wegfällt. Dies geschieht in Abb. 9 im Schritt von E nach F. Da in der Wirklichkeit die Verbindungen der Knoten für funktionale Zusammenhänge stehen, können diese nur verändert werden, wenn die beteiligten Komponenten des Systems sich verändern, also mutieren. Bei dem einfachen nichtreduzierbar komplexen System aus Abb. 9 müssten also alle sechs Knoten gleichzeitig ihre Funktion verändern, um den Wegfall des inneren Knotens zu verkraften. Bei noch komplexeren Systemen wären noch mehr Knoten beteiligt. Übertragen auf biologische Systeme entspräche dies *gleichzeitigen* Mutationen mehrerer Komponenten eines Systems, was erneut in biologischen Systemen unrealistisch ist. Um dieses Problem zu umgehen, müsste SADEDINS Modell erweitert werden: Jeder Evolutionsschritt beinhaltet nicht mehr das Hinzufügen oder Wegnehmen von Knoten, sondern auch die Verbindungen müssten sich schrittweise verändern. Dadurch gäbe es Zwischenstufen wie in Abb. 10 dargestellt.

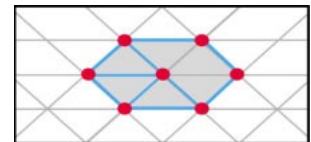


Abb. 10

Fazit. Die Argumentation in dieser Veröffentlichung ist gemessen an realen biologischen Systemen viel zu einfach und in wesentlichen Punkten unrealistisch. Der Begriff der „Komplexität“ wird zunächst so stark verallgemeinert, dass er sogar bei ganz elementaren, nach üblichem Verständnis gar nicht komplexen (also unkomplizierten) Sachverhalten verwendbar ist. Dass einfache Gebilde durch Zufall (Würfeln) erzeugt werden können, weiß aber jedes Kind. Die Arbeit geht deshalb in ihrem Ansatz und ihren Kernaussagen völlig an dem vorbei, was in der Diskussion über nichtreduzierbare Komplexität in der Biochemie erörtert werden müsste, nämlich die Entstehung von zielgerichteten Mechanismen, deren Einzelbestandteile keine abstrakten Punkte und Striche, sondern ihrerseits aufwändig herzustellende Gebilde sind.

Im SADEDIN-Modell sind die Zwischenphasen zur Erreichung eines „komplexen“ Zielzustandes konzeptionell ganz offensichtlich. Dass sie später zumeist nicht mehr erkennbar sind, ist demgegenüber nachrangig. Im Falle der Biologie ist gerade die konzeptionelle Möglichkeit von Zwischenphasen eines der Hauptprobleme.

Genduplikation

Als weiteren Schlüssel zum Verständnis der Evolution von IC wird von Kritikern des IC-Arguments auf Genduplikationen verwiesen (z. B. ORR 1996/1997; WEBER 1999³⁹; FORREST & GROSS 2007⁴⁰; vgl. BEHE 2000b). So sind einige Proteine, die in der Kaskade des Blutgerinnungssystems vorkommen, untereinander ähnlich. Durch Genduplikationen entstünden Gene, die zunächst noch nicht essentiell seien. Im Laufe der Zeit könnten das kopierte Gen sich ändern und eine neue, oft verwandte Funktion annehmen und schließlich essentiell werden. Dieses Szenario ist jedoch im Wesentlichen nicht experimentell belegt, sondern wird aufgrund vergleichend-biologischer Argumente theoretisch erschlossen. Das heißt: Es gibt ähnliche Proteine, und aufgrund des Homologie-Arguments wird daraus eine gemeinsame Abstammung abgeleitet, an deren Beginn eine Genduplikation stand. Bisherige experimentelle Studien zur Proteinevolution stützen die Vorstellung der Entstehung neuer Proteinfunktionen durch Evolutionsprozesse jedoch nicht (LEISOLA 2004). Duplizierte Gene, die eine *veränderte* Funktion erwerben, müssen in das Gesamtsystem sinnvoll eingebaut und reguliert werden. Die Schritte von der Duplikation bis zur Integration ins System werden in JUNKER & SCHERER (2006) diskutiert. Der Hinweis auf das Vorkommen von Genduplikationen kann also nicht als Schwächung oder gar Widerlegung des IC-Arguments gelten. Hier gilt wiederum das, was weiter oben schon gesagt wurde: Mögliche Hinweise auf gemeinsame Abstammung (hier: Indizien auf Genduplikationen) sind an sich keine Hinweise auf zugrundeliegende Mechanismen (vgl. BEHE 2000b). „Um die Wirkung der natürlichen Auslese zu untersuchen benötigt man weitaus mehr Evidenzen als bloße Sequenzähnlichkeiten: es sind *Experimente* erforderlich“ (BEHE 1997; Hervorhebung im Original)⁴¹ Am Beispiel des Blutgerinnungssystems macht BEHE (2000b) klar: „Um zu erklären, wie diese Kaskade entstand, müsste der Forscher daher eine detaillierte Abfolge vorschlagen, durch die ein verdoppeltes Protein in die Kaskade eingebaut wurde, wobei dieses einen neuen Zweck erfüllen muss und einen neuen Aktivator benötigt.“⁴² Er hebt weiter hervor, dass neben verschiedenen Randbedingungen besonders die genaue Regulation der Vorgänge essentiell wichtig ist und dass dieser Aspekt nicht ignoriert werden darf. Es kommt also darauf an, Basisfunktionszustände (s. o.) möglichst exakt zu bestimmen, um dann zu prüfen, ob und wie sie mit Hilfe von Duplikationen überwunden werden können.

Viele Proteine nichtreduzierbar komplexer Strukturen sind aber ohnehin so verschieden, dass es für

eine Entstehung durch Duplikationen anderer Gene des Systems keine Hinweise gibt. Daher wird vermutet, dass neue Proteine eines Systems durch Rekrutierung von Proteinen gewonnen werden, die bereits in einem anderen Zusammenhang eine Funktion ausüben. Darauf kommen wir im folgenden zu sprechen.

Kooption und Funktionswechsel

Als weiterer Einwand gegen das IC-Argument wird angeführt, dass die Einzelteile eines nichtreduzierbar komplexen Systems zuvor bereits andere Funktionen erfüllt haben können und in einen neuen Funktionszusammenhang übernommen worden seien (dies wurde auch im o.g. theoretischen Szenario von WASCHKE angenommen; vgl. auch WASCHKE 2007, 99; FORREST & GROSS 2007; GISHLICK 2004, 59; THORNHILL & USSERY 2000; MILLER 2000, 150f.; s. auch GENE 2007, 229f.; DEMBSKI 2002, 254ff.). Man spricht von „Kooption“ („co-option“) oder auch von Exaptation.⁴³ Viele Beispiele werden in diesem Sinne interpretiert; eines davon (der TTSS-Apparat) soll weiter unten diskutiert werden. Doch die Möglichkeit einer Kooption trifft das IC-Argument nicht. Denn IC bedeutet, dass die *aktuelle* Funktion eines Systems verloren geht, wenn ein beliebiges Bauelement entfernt wird, und darauf nimmt das IC-Argument Bezug. Ob die Einzelbausteine *andere* Funktionen haben (oder vor einem Einbau hatten), ist für das IC-Argument irrelevant (vgl. Abschnitt „Funktionsfähige Vorstufen oder Einzelteile“ im Eingangskapitel). Es wurde bereits erwähnt, dass BEHE die Möglichkeit, dass Einzelteile eines IC-Systems eine andere Funktion haben können, in „*Darwin's Black Box*“ diskutiert.

Um das IC-Argument unter Hinweis auf die Möglichkeit einer Kooption zu widerlegen, müsste gezeigt werden, wie ein IC-System durch Kooptionen auf der Basis bekannter Evolutionsmechanismen entstanden ist. Dazu muss folgendes untersucht und geklärt werden: 1. die bisherige Funktion des eingebauten Bauteils, 2. die bisherige Funktion des Systems, in welches das Bauelement eingebaut wurde, 3. die Regulation des Einbaus und 4. die Selektionsdrücke, die dies gefördert haben, oder alternativ ein realistisches Modell, wie der Einbau durch die Mechanismen der neutralen Evolution erfolgt sein könnte. Der Einbau von Teilen, die ursprünglich für eine andere Funktion selektiert wurden, in ein neues System mit anderer Funktion erfordert mehrere aufeinander abgestimmte Schritte gleichzeitig (vgl. DEMBSKI 2002, 255f.). Eine Einführung in die Problematik der Mechanismen eines solchen Einbaus gibt NEUHAUS (2002).⁴⁴ Für *komplexe* Systeme ist Kooption bisher experimentell nicht nachgewiesen; dieser hypothetische Vorgang wird hauptsächlich aufgrund vergleichend-biologischer Argumente postuliert (vgl. dazu auch JUNKER 2007).⁴⁵

WASCHKE (2003) bringt folgendes Beispiel für einen Funktionswechsel (vgl. auch GISHLICK 2004, 59ff.): „Ein klassisches Beispiel sind die Federn der Vögel. Diese Strukturen entstanden vermutlich nicht als Anpassung an das Fliegen, sondern als Wärmeisolierung. Diese

Argumentation war schon seit Darwins Zeiten als Funktionswechsel bekannt. Man kann sich daher leicht vorstellen, wie Systeme, die im Nachhinein nichtreduzierbar komplex sind, durchaus aus Einzelkomponenten zusammengesetzt wurden, die jeweils zu einem anderen Zweck in kleinen, jeweils selektionsbegünstigten Schritten entstanden sind. Die konkreten Details lassen sich aber nur durch naturalistische Forschung aufklären.“ Für die Behauptung, man könne sich „leicht vorstellen, wie Systeme, die im Nachhinein nichtreduzierbar komplex sind, durchaus aus Einzelkomponenten zusammengesetzt wurden“, fehlen jedoch überzeugende Belege. Die vorgeschlagenen Modelle müssen im Detail betrachtet werden, um ihre Erklärungskraft einschätzen zu können. Dies gilt insbesondere für das genannte Beispiel der Entstehung von Federn, bei welchem die im übrigen spekulative Annahme des Funktionswechsels neue Fragen aufwirft. Die Schritte, die zur Nichtreduzierbarkeit geführt haben, müssen im einzelnen aufgezeigt werden. Allgemeine und vage gehaltene Formulierungen reichen dafür nicht aus (vgl. Abschnitt „Unrealistische Vereinfachungen“). Dazu muss hier auch wieder kritisch eingewendet werden, dass Federn ein komplexes System aus Teilsystemen sind, auf welches das IC-Argument nicht direkt anwendbar ist (vgl. das im Abschnitt „Von redundanter zu nichtreduzierbarer Komplexität“ Gesagte).

Das Beispiel der Entstehung der Vogelfeder ist jedoch geeignet, um das Procedere zu erläutern, das durchlaufen werden muss, um die Existenz von IC begründen zu können. Eine flugtaugliche Feder müsste nicht direkt aus Reptilschuppen oder anderen Vorstufen entstanden sein. Eine Wärmeisolierungsstruktur könnte in der Tat eine morphologische Vorstufe der flugtauglichen Feder sein. Für diesen Zweck bräuchte diese federartige Struktur weder Haken und noch andere Eigenschaften, die nur für das Fliegen erforderlich sind, zu besitzen. Weiter oben wurde der Begriff „Basisfunktionszustand“ eingeführt. Eine wärmedämmende Federstruktur könnte ein solcher Basisfunktionszustand sein. Zu überbrücken wären dann die Wege von einer hypothetischen Vorläuferstruktur bis zu dieser wärmedämmenden Struktur und dann von dieser bis zur flugtauglichen Feder. Zu klären ist also, ob von einem Basisfunktionszustand bis zum nächsten IC-Komplexität dazukommen muss. Dies erfordert eine eingehende Analyse und vermutlich noch einiges an Forschungsarbeit.

Zu klären ist also, ob der Weg von einem Basisfunktionszustand zu einem anderen durch evolutionäre Mechanismen (z. B. durch Kooptionschritte) überbrückbar ist und welche Selektionsdrücke dies begünstigen (vgl. JUNKER 2007). Die Feststellung von IC steht dann am vorläufigen Ende einer Untersuchung, während am Anfang eine Vermutung steht, eine Hypothese, die Forschung anregt und prüfbar ist. Wenn MILLER (2004, 93) vom „Dogma der nichtreduzierbaren Komplexität“ spricht, ist dies nicht seriös.

Interessant ist in diesem Zusammenhang folgendes Prüfkriterium für vergangene Kooptionen, das GENE

(2007, 229-235) erläutert: GENE erwartet bei einer Entstehung einer molekularen Maschine durch sukzessive Kooptionen, dass zum einen einfachere Vorstufen existieren sollten (mit weniger Teilen), zum anderen aber auch andere Kombinationen einzelner Bausteine mit anderen Elementen (GENE 2007, Abb. 8-5 auf S. 234). Sollten die meisten Bauelemente einer molekularen Maschine jedoch *exklusiv* nur in dieser Maschine vorkommen, spräche dies gegen das Kooptions-Modell.⁴⁶

Der TTSS-Apparat. MILLER (2000; 2004) und viele andere führen das „Typ III Sekretions-System“ (TTSS) als Vorstufe der Bakteriengießel an. Der TTSS-Apparat ermöglicht gram-negativen Bakterien, Proteine direkt ins Cytoplasma einer Wirtszelle einzuschleusen. Er weist eine große Anzahl von Homologien mit der Bakteriengießel auf: 18 Proteine des TTSS-Apparats sind auch Bestandteile der Bakteriengießel, die aus ca. 40 Proteinen besteht. Diese Homologien würden beweisen – so MILLER (2004, 86) –, dass die Bakteriengießel *reduzierbar* komplex sei. Evolutionäre Prozesse hätten offenbar wesentliche Teile des TTSS-Apparats mit anderen Proteinen kombiniert (Kooption) und dadurch eine neue Funktion geschaffen (S. 87; vgl. Abb. 11). Der TTSS-Apparat sei voll funktional, obwohl ihm viele Teile der Bakteriengießel fehlen, die die Bakteriengießel mithin *reduzierbar* komplex. MILLER (2004, 87) schreibt: „Es ist zu erwarten, dass der Opportunismus evolutionärer Prozesse Proteine kombinieren und aufeinander abstimmen würde, um auf diese Weise zu neuen und neuartigen Funktionen zu gelangen.“⁴⁷ Auf

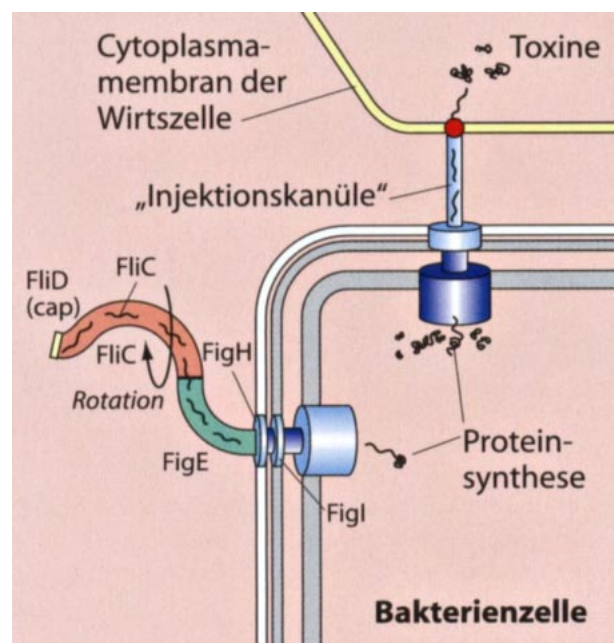


Abb. 11: Vergleich von Typ II-Sekretionsapparat (rechts) und Bakterienmotor (links). Beide sind in der Zellhülle des Bakteriums befestigt. Der Sekretionsapparat eines Krankheitserregers injiziert Toxine in eine Zelle des Wirtes (oben gezeichnet). Nur ein Teil der Proteine des Bakterienmotors hat Ähnlichkeiten mit dem Sekretionsapparat. (Nach JOURNET et al. 2005)

diesem Wege sei aus dem TTSS-Apparat die Bakteriengeißel entstanden. Ähnlich argumentiert auch MUSGRAVE (2004).⁴⁸

Diese Argumentation widerlegt das IC-Argument jedoch in keiner Weise. MILLER macht nämlich einige unzutreffende Behauptungen über das IC-Konzept, vor allem die Behauptung, Einzelteile eines IC-Systems dürften keine Funktion haben (S. 87, 91). Das ist falsch (wie oben bereits mehrfach vermerkt), vielmehr dürfen Einzelteile nicht *dieselbe* Funktion haben wie das in Rede stehende IC-System (hier: wie die Bakteriengeißel). Selbstverständlich dürfen Einzelteile *andere* Funktionen ausüben, ohne dass dadurch das IC-Argument tangiert wird. Das gilt schon für das Mausefallen-Beispiel: Deren Einzelteile besitzen teilweise ebenfalls eine Funktion (und dies wird wie erwähnt von BEHE sogar besprochen). Schon aus diesem Grund eignet sich der TTSS-Apparat nicht als Kritik am IC-Konzept. (Dieselbe Kritik an den Ausführungen MILLERS gilt für das Beispiel des Krebs-Zyklus [MILLER 2004, 92]. Dass dessen Einzelelemente Funktionen haben, tangiert das IC-Argument genauso wenig; die entscheidende Frage ist, wie sie zum Krebs-Zyklus kombiniert wurden; MILLER verweist auf ein gene-tinkering; dazu kritisch NEUHAUS [2002].)

Es sind aber noch weitere kritische Anmerkungen angebracht. Wir kommen dazu erneut auf den Begriff „Basisfunktionszustand“ zurück. Der TTSS-Apparat kann möglicherweise als Basisfunktionszustand angesehen werden. Eine Analyse auf nichtreduzierbare Komplexität beinhaltet – wie oben dargelegt – den Versuch, mögliche Wege zur Entstehung einer IC-Struktur so kleinschrittig wie möglich zu zerlegen und auf diese Weise eine Kette von Basisfunktionszuständen zu bilden. Erst wenn dies erfolgt ist, kann geprüft werden, ob diese minimalen Schritte evolutiv überbrückbar sind. MUSGRAVE (2004) nennt gerade einmal drei hypothetische Vorstufen für eine Maschine, die aus 40 Proteinen besteht. Selbst wenn man weitere hypothetische Vor- oder Zwischenstufen hinzunimmt, fängt die Aufgabe gerade erst an: Es muss gezeigt werden, dass die hypothetischen Stufen mit bekannten Evolutionsmechanismen überbrückbar sind.

Im Falle des TTSS-Apparats und der Bakteriengeißel kann es keinen Zweifel geben, dass die Schritte bis zum TTSS-Apparat und weiter von diesem zur Bakteriengeißel nicht überbrückt sind. Dies räumt auch MILLER (2004, 88) ein. Und in diesen Fällen sind die zu überbrückenden Schritte gewaltig, denn der Bakterienmotoren bestehen aus ca. 40 Proteinen, die *aufeinander abgestimmt sein und reguliert werden* müssen.⁴⁹ Die Homologien mit anderen Proteinen sind teilweise umstritten, so dass in diesen Fällen unklar ist, aus welcher ursprünglichen Funktion sie rekrutiert wurden, um mit dem TTSS-Apparat zur Bakteriengeißel zusammengebaut zu werden. Aber selbst wenn sich herausstellen würde, dass es für alle Proteine des Bakterienmotors Homologa zu anderen Proteinen gibt, stellt sich die Frage nach deren koordiniertem Zusammenfügen, damit die neue Funktion des Motors erfüllt werden kann.

Solange dazu nichts Konkretes gesagt werden kann, bieten die Homologien zwischen dem TTSS-Apparat und der Geißel nur ein *vergleichend biologisches Argument*, dem für sich alleine keinerlei Beweiskraft zugunsten Evolution zukommt (JUNKER 2002, Kap. 2) und welches vor allem nichts über *Mechanismen* aussagt, um die es hier (und allgemein bei ID) gerade geht (siehe Abschnitt „Vergleichende Biologie als Argument“).– In JUNKER & SCHERER (2006, 159ff.) wird der angenommene Funktionswechsel vom TTSS-Apparat zum Motor quantitativ behandelt.

Schließlich sprechen Vergleiche der Gensequenzen und andere Argumente dafür, dass der TTSS-Apparat *nicht eine Vorstufe* der Bakterien-Geißel war, sondern allenfalls (wenn man einen phylogenetischen Kontext zugrundelegt) *aus ihr hervorging* (MINNICH & MEYER 2004, 8; PITMAN 2005). Demnach könnte – evolutionstheoretisch betrachtet – die TTSS-Pumpe aus dem Motor evolviert sein, nicht umgekehrt, und dabei einige Teile (und damit auch seine ursprüngliche Funktion) verloren haben.⁵⁰ Auch dieser Umstand alleine macht das IC-kritische Argument in diesem Beispiel zunichte.

Insgesamt bietet der TTSS-Apparat keine nennenswerten Anhaltspunkte für eine Kritik der IC-Argumentation am Beispiel der Bakteriengeißel.

Experimenteller Nachweis der Entstehung einer IC-Struktur?

Nachweis der evolutiven Entstehung einer IC-Struktur? Das IC-Argument könnte durch den Nachweis einer evolutiven Entstehung einer IC-Struktur widerlegt werden. Es würde genügen, diesen Nachweis in nur *einem einzigen Fall* zu führen, um die Plausibilität des IC-Arguments *für vergleichbar komplexe* Beispiele entscheidend zu schwächen. Es ist also *nicht* erforderlich, für *jede* IC-Struktur deren evolutive Entstehung nachzuweisen; das wäre aus praktischen Gründen unmöglich. Wenn es jedoch nur einmal gelingt, könnte man mit einigem Recht argumentieren, dass auch andere *vergleichbare* Komplexitäten evolutiv entstehen können. Dieser Sachverhalt soll besonders betont werden, da kritisiert wird, dass ID-Befürworter einfach auf ein neues, noch unerforschtes Beispiel übergehen würden, wenn die evolutive Entstehung einer IC-Struktur bewiesen würde. Es muss hier aber auch bedacht werden: Der Nachweis der evolutiven Entstehung einer *geringfügig* komplexen Struktur würde die Entstehung *höher* komplexer Strukturen natürlich nicht erklären. Dabei muss natürlich ein Maß für das Ausmaß der Komplexität gefunden werden, damit exakt argumentiert werden kann.

GENE (2007, 224f.) macht weiterhin darauf aufmerksam, dass IC-Beispiele von Maschinen und Stoffwechsellaskaden deutlich verschieden zu bewerten sind. Die jeweilige Komplexität sei von sehr verschiedener Qualität. Die Funktion der Maschinen hängt von direkten, spezifischen Verbindungen der einzelnen Komponenten ab, während eine solche Verbindung bei Stoffwech-

selwegen nicht besteht. Fällt bei Stoffwechselwegen eine Komponente aus, kann aufgrund der Verflechtungen verschiedener Wege und aufgrund der Fähigkeit vieler Enzyme, verschiedene Substrate zu binden, ein Ersatzenzym in die Lücke springen.

Aus diesen Gründen muss genau Rechenschaft darüber abgegeben werden, welche Qualität von Komplexität durch empirische Daten nachgewiesen werden kann. An diesem Punkt hakt BEHE (2001) in seiner Replik auf Kritikpunkte ein (vgl. dazu auch BEHE 2000d). Er setzt sich mit einem Argument von MILLER (2000, 145ff.) auseinander, in welchem dieser behauptet, es sei bereits geglückt, die evolutive Entstehung einer IC-Struktur nachzuweisen. MILLER beruft sich dabei auf eine Arbeit von Barry HALL über das Lactose verwertende System von *E. coli*. Tatsächlich wird in der Studie von HALL aber nur gezeigt, dass nach dem Ausschalten der Galactosidase, *einem einzigen* Teil des Systems, ein anderes Enzym dessen Funktion übernahm. Dabei waren nur geringfügige Änderungen mikroevolutiver Art erforderlich, denn das Ersatz-Enzym besaß bereits in gewissem Umfang die Fähigkeit, Lactose zu hydrolysieren. Eine solche Veränderung ist vergleichbar mit dem Erwerb von Antibiotikaresistenz und weit vom Erwerb einer neuen IC-Struktur entfernt. Der Ersatz durch das neue Enzym gelang zudem nicht durch ungelentete Evolutionsmechanismen, denn das System musste durch Intervention künstlich am Leben erhalten werden, solange die Bakterien Lactose nicht verwerten konnten (Details dazu in BEHE 2001, 689ff.). Damit zeigt die Originalarbeit von HALL das Gegenteil dessen, was MILLER behauptete: Ohne gezielten Eingriff wäre die Funktion verloren gegangen. Der betreffende Vorgang wird also genau dann angemessen beschrieben, wenn der Designer (der eingreifende Experimentator) nicht ausgeblendet wird. Das IC-Argument hat sich also bewährt.

Das Blutgerinnungssystem. DOOLITTLE (1997) behauptet unter Bezugnahme auf eine Arbeit von BUGGE et al. (1996), es sei möglich, das Blutgerinnungssystem ohne Funktionsverlust zu vereinfachen. BEHE (2001, 687f.) zeigt jedoch, dass DOOLITTLE die Arbeit von BUGGE et al. falsch verstanden hat. BUGGE et al. hatten folgendes gezeigt: Wenn entweder das Gen für Plasminogen oder wenn das Gen für Fibrinogen ausgeschaltet wird, dann funktioniert die Blutgerinnung nicht mehr. Dagegen funktionierten – so wiederum DOOLITTLE – Doppelmутanten (Kombination von zwei Mutationen durch Kreuzung) normal, folglich sei ein weniger komplexes Blutgerinnungssystem noch funktionsfähig. Doch dies trifft nicht zu: BUGGE et al. schreiben, dass die Doppelmутanten sich phänotypisch nicht von Einzelmутanten unterscheiden. BUGGE et al. hatten nur gezeigt, dass *manche* Probleme der Einzelmутanten bei den Doppelmутanten nicht auftreten, nicht aber, dass ein Teil des Blutgerinnungssystems verzichtbar ist. Ihre Studie bestätigte also die Nichtreduzierbarkeit und somit auch hier (wie bei MILLER, s. o.) das Gegenteil von dem, was behauptet wurde. In einer späteren Publika-

tion geht BEHE (2004) ebenfalls auf dieses Beispiel ein und zeigt, dass manche weitere Kritiker die fehlerhafte Rezeption durch DOOLITTLE unkritisch übernommen haben.

Ein weiterer Kritiker, Keith ROBISON, schildert ein Szenario, wie in eine bestehende biochemische Kaskade ein neues Element eingebaut werden kann (ROBISON 1996). In seiner Analyse zeigt BEHE (2000b) jedoch, dass ROBISON zum einen mit einer sehr komplexen Ausgangssituation startet, zum anderen mindestens vier notwendige aufeinanderfolgende und aufeinander abgestimmte Schritte benötigt werden, um einen neuen selektionspositiven Zustand zu erreichen (das heißt: einen neuen Basisfunktionszustand in der Terminologie von SCHERER 1995; siehe oben). Das aber ist gerade kein ungeleiteter, darwinscher Prozess, sondern intelligente Steuerung. ROBISON beweist also gerade das Gegenteil dessen, was er anstrebt.

Knockout-Experimente. Aufgrund der Redundanzen in den Stoffwechselkaskaden (Vgl. Abschnitt „Fazit: Wie entsteht redundante Komplexität?“) ist es möglich, dass bei Ausfall einer Komponente ein Ersatzmolekül einspringen kann, wobei eventuell noch eine Mutation erforderlich ist. Solche Beispiele wurden öfter beschrieben (z. B. MILLER 2000, 144); es handelt sich dabei um mikroevolutive Prozesse, d. h. es wird von einem funktionsfähigen System ausgegangen, das beschädigt wird und dank Redundanzen und Variationsfähigkeit repariert werden kann. Eine grundlegend neue Funktion entsteht dabei nicht.

Die meisten Gene, die den Bakterienmotor codieren, wurden durch knockout-Mutanten gefunden, zunächst meist zufällig durch Untersuchung bewegungsunfähiger Mutanten. Später wurden mögliche Motorgene anhand von Sequenzähnlichkeiten ermittelt und dann ausgeschaltet, um die Wirkung auf die Motorstruktur und Motorfunktion zu untersuchen. In den meisten Fällen stellte sich heraus, dass das Ausschalten von Motorgen einen bewegungsunfähigen Phänotyp zur Folge hat (nähere Details bei SCHERER 2008).

Neue Substratspezifitäten. Ähnlich wie die Befunde bei Knockout-Experimenten ist der Erwerb neuer Substratspezifitäten zu bewerten. GENE (2007) zeigt anhand des Beispiels des künstlich hergestellten PCP (Pentachlorophenol), dass der Abbau neuer Stoffe durch evolutive Prozesse ermöglicht werden kann (vgl. auch DUNKELBERG 2003; COPLEY 2000). Der entsprechende Stoffwechselweg ist nichtreduzierbar komplex, aber dennoch evolviert. Allerdings beruht seine evolutive Entstehung darauf, dass ein Stoffwechselweg bereits vorhanden war, der ein ähnliches Molekül abbauen konnte. Es wurde also keine neue Grundfunktion erworben. Außerdem wurde der Abbau des neuen Stoffes durch einen Steuerungsdefekt ermöglicht, der dazu führte, dass eines der Enzyme der Stoffwechselwegs permanent synthetisiert wurde und nicht nur bei Anwesenheit seines normalen Substrats. Schließlich sind die drei am Abbau des PCP beteiligten Enzyme nur in

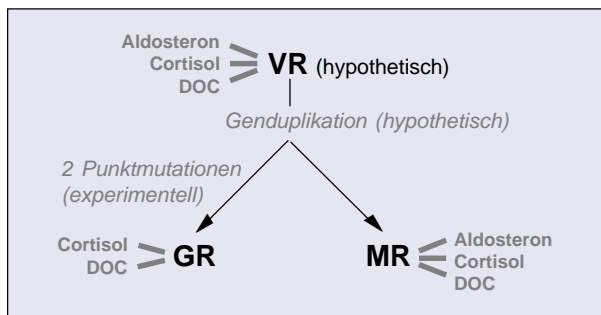


Abb. 12: Überblick über die beschriebenen Evolutionsvorgänge. Die Balken symbolisieren Bindungsfähigkeit. VR Vorläufer-Rezeptor, GR Glucocorticoid-Rezeptor, MR Mineralocorticoid-Rezeptor. Näheres im Text.

sehr einfacher Weise interagierend, nämlich insofern, als einzelne Schritte aufeinander aufgebaut sind. Beispiele dieser Art sind daher nicht geeignet, die evolutive Entstehung nichtreduzierbar komplexer Systeme plausibel zu machen, da die Existenz eines solchen Systems bereits vorausgesetzt wird.⁵¹

Die Experimente von Bridgham et al. BRIDGHAM et al. (2006) veröffentlichten in der renommierten Wissenschaftszeitschrift *Science* einen Artikel, der sich anhand naturwissenschaftlicher Befunde mit dem IC-Konzept auseinandersetzt. Die Arbeit von BRIDGHAM et al. wurde als so bedeutsam eingestuft, dass in derselben *Science*-Ausgabe auch ein Kommentar dazu von Christoph ADAMI erschien, in welchem er ebenso wie BRIDGHAM et al. fast ausschließlich naturwissenschaftlich argumentiert.

ADAMI (2006) behauptet, die Arbeit von BRIDGHAM et al. habe gezeigt, wie ein IC-System durch evolutive Prozesse entstehen kann, nämlich durch eine Genduplikation und wenige Punktmutationen. Das IC-Argument sei damit widerlegt. Damit bestätigt ADAMI zunächst, dass das ID-Argument naturwissenschaftlich widerlegbar ist.

Was haben BRIDGHAM et al. gezeigt? Es geht um die Bindung von Hormonen an Rezeptorproteine. Solche Rezeptoren setzen Signalkaskaden in der Zelle durch die Bindung der Hormone an Rezeptoren in Gang. Dadurch werden spezifische physiologische Vorgänge ausgelöst. Die Ergebnisse der Experimente von BRIDGHAM können in wenigen Sätzen beschrieben werden (nach BEHE 2006): Die Autoren starteten ihre Experimente mit einem Rezeptorprotein, welches die Fähigkeit besaß, mit drei verschiedenen Steroidhormonen (Aldosteron, Cortisol and 11-Deoxycorticosteron [DOC]) stark wechselzuwirken. Durch Punktmutationen wechselwirkte dieses Protein viel schwächer mit diesen drei Steroiden. Eine bereits vorhandene Fähigkeit wurde also abgeschwächt. Soweit der nackte *experimentelle* Befund. Er belegt offenkundig in keiner Weise die Entstehung von IC und es stellt sich angesichts dieses Befundes die Frage, weshalb die Autoren und der Kommentator die evolutive Entstehung eines IC-

Systems gezeigt haben wollen. Dazu muss etwas ausgeholt werden.

Die Autoren rekonstruierten einen *hypothetischen* Vorläufer-Rezeptor (VR), von dem zwei *heute vorkommende* Rezeptor-Typen evolviert sein sollen, nämlich der Glucocorticoid-Rezeptor (GR) und der Mineralocorticoid-Rezeptor (MR) (Abb. 12). MR und GR üben verschiedene Signalfunktionen aus (BRIDGHAM et al. 2006, 97). Die heutigen Rezeptoren sollen durch eine Genduplikation (ein hypothetisches Ereignis; das Vorkommen von Genduplikationen ist aber grundsätzlich experimentell belegt) und durch Punktmutationen aus dem VR entstanden sein. Der künstlich hergestellte hypothetische VR kann wie das heutige MR die strukturell ähnlichen Hormone Aldosteron, Cortisol und DOC (s.o.) stark binden (vgl. Abb. 12 und 13). Zur Zeit, als der VR (auf unbekannte Weise) entstand (nämlich nach evolutionstheoretischen Vorstellungen vor 450 Millionen Jahren), gab es aber noch kein Aldosteron (dies wird indirekt durch vergleichende Studien an heutigen Organismen erschlossen und soll hier *zugunsten des evolutionstheoretischen Arguments* nicht problematisiert werden). Damit muss die Aldosteron-Affinität des VR damals ein Nebenprodukt der Affinität zu den anderen Steroidhormonen gewesen sein.

Durch zwei Aminosäureaustausche gelangte man nun vom VR ausgehend zum GR, der Cortisol und DOC, nicht aber Aldosteron binden kann (Abb. 12). Treten die beiden dazu erforderlichen Mutationen nacheinander auf, so führt dies entweder über eine Zwischenstation, in der der Rezeptor die drei Hormone gar nicht oder nur ganz schwach binden kann oder auf der er

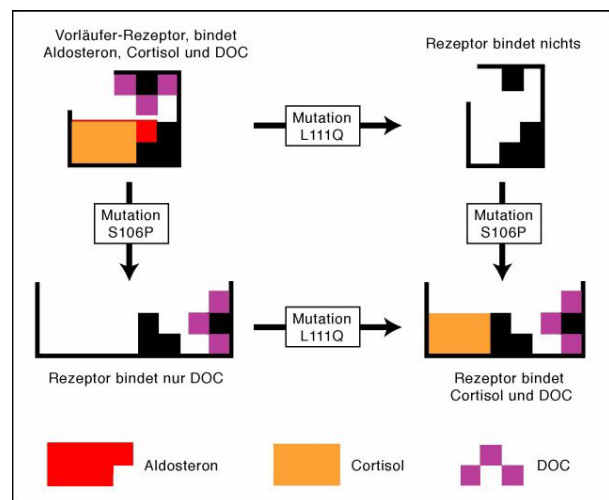


Abb. 13: Dieses Bild zeigt links oben schematisch den hypothetischen Vorläufer-Rezeptor, der Aldosteron, Cortisol und DOC bindet. Die Mutation L111Q führt zum Verlust der Bindungsfähigkeit des Rezeptors (dargestellt durch Verformung der Bindungstasche). Die Mutation S106P führt dazu, dass Aldosteron und Cortisol nur noch sehr schwach gebunden werden können, während DOC unverändert gebunden werden kann. Beide Mutationen zusammen erlauben wieder eine starke Bindung von Cortisol; Aldosteron passt jedoch nach wie vor nicht mehr. (Nach ADAMI 2006)

DOC und die anderen beiden Hormone nur schwach binden kann (in Abb. 13 rechts oben bzw. links unten). Die jeweils zweite Mutation führte dann zum heutigen GR, das die (in diesem Szenario erneute!) Fähigkeit besitzt, Cortisol (stärker) zu binden (während Aldosteron nach wie vor nicht mehr gebunden wird) (in Abb. 13 die Schritte nach rechts unten). Das andere Duplikat des VR wurde zum heutigen MR, das wie der VR alle drei Hormone binden kann.

BRIDGHAM et al. heben hervor, dass die Aldosteron-Sensitivität des MR schon in seinem VR-Vorläufer vorhanden war, *bevor es das Aldosteron überhaupt gab* (s. o.). Der VR und seine Nachfolger waren also präadaptiert für eine Sensitivität für Aldosteron. Dieser (nur indirekt erschlossene!) Vorgang ist es, der von BRIDGHAM et al. und ADAMI als Beleg für die Evolution einer IC-Struktur gewertet wird: „This evolutionary scenario – recruiting an ancient receptor into partnership with a novel ligand ...“ (BRIDGHAM et al. 2006, 100).

Aus den vorstehenden Beschreibungen geht hervor (wie oben kurz dargestellt), dass die einzigen Vorgänge dieses Szenarios, die experimentell belegt sind, die Folgen der beiden beschriebenen Punktmutationen sind (wie in Abb. 12 dargestellt).

Kritik. Gegen die Interpretation dieser Vorgänge als Belege für die evolutive Entstehung von IC gibt es schwerwiegende Einwände (die meisten Kritikpunkte im Folgenden nach BEHE 2006):

1. Selbst wenn der Erwerb der Affinität des VR (bzw. späteren MR) zu Aldosteron ein zufällig passendes Nebenprodukt war (wie oben beschrieben), handelt es sich doch um ein strukturell ähnliches Molekül im Vergleich zu Cortisol und DOC.

2. Es handelt sich nach der Definition von BEHE (s. o.) gar nicht um ein IC-System, da es nur aus einem einzigen Protein (Rezeptor) und seinem Liganden (dem Hormon) besteht. Das Rezeptor-Hormon-Paar ist dabei nur ein kleiner Teil einer Signalübertragskaskade, die andere komplexe physiologische Prozesse reguliert. Rezeptor-Liganden-Paare besitzen für sich alleine selektierbare Funktionen (vgl. dazu auch NELSON 2006). Es wird also nur ein für sich alleine funktionsloser Teil eines IC-System betrachtet.

3. Im Experiment wurden weder neue Komponenten hinzugefügt noch alte entfernt.

4. Es wurde die schon vorhandene Fähigkeit eines Proteins, bestimmte (ähnliche) Moleküle zu binden, lediglich geschwächt. Die Experimente starteten mit einem Protein, welches mehrere strukturell sehr ähnliche Steroide stark binden kann und hatten als Ergebnis ein Protein, das zwei der Steroide höchstens 10mal schwächer binden konnte.

Fazit. Von einem Erwerb einer IC-Struktur durch ungerichtete evolutive Prozesse kann in keiner Weise die Rede sein.

Modularität und „exploratives Verhalten“

In ihrem Buch „The Plausibility of Life“ befassen sich Marc KIRSCHNER und John GERHART im Schlusskapitel kurz mit „Intelligent Design“ und speziell mit „nichtreduzierbarer Komplexität“ (S. 267-269). Mit dem Konzept der schwachen regulatorischen Verknüpfungen („weak linkage“) und der damit verbundenen Modularität der Organsysteme sowie der Fähigkeit des explorativen Verhaltens soll nach Auffassung dieser Autoren das Problem der Entstehung von IC-Strukturen lösbar sein. Mit explorativem Verhalten ist gemeint, dass die ontogenetische Formbildung nicht streng deterministisch verläuft, sondern mit einigen Freiheitsgraden, die durch variable Randbedingungen eingeschränkt werden. Die Autoren kritisieren am IC-Argument, dass die *Natur* der Komplexität von Lebewesen nicht beachtet werde (S. 267). Die Bestandteile molekularer Maschinen und Apparate der Lebewesen seien nicht starr zusammengesetzt wie bei technischen Geräten. Vielmehr können sie flexibel auf unterschiedliche Weise zusammengefügt werden, und dadurch neue Funktionen erfüllen. Die Autoren greifen eines der Beispiele von BEHE auf, nämlich das Sehen. Dessen Komponenten seien bei den Insekten und Wirbeltieren denselben konservierten Kernprozessen entnommen worden, die in beiden Organismengruppen vorkommen. Die Signalkaskaden im Insektenauge und im Wirbeltierauge besäßen gleichermaßen die schwachen Verknüpfungen, die sie von den ersten eukaryotischen Einzellern vor etwa zwei Milliarden Jahren geerbt hätten. BEHE sehe die Begrenzungen in dem speziellen Design, jedoch nicht dessen Auflösungsmöglichkeiten.⁵² Das IC-Argument können KIRSCHNER & GERHART aber mit dem Hinweis auf konservierte Kernprozesse und der leichten Möglichkeit des neuen Zusammenbaus nicht entkräften, denn das IC-Argument berücksichtigt solche Möglichkeiten ausdrücklich. Selbst wenn das molekulare Neu-„Zusammenstecken“ von Teilen mechanistisch⁵³ funktionieren würde (der experimentelle Nachweis steht aus; es wird nur vergleichend-biologisch argumentiert!), wären dennoch mehrere aufeinander abgestimmte Schritte nötig, um auf neue Basisfunktionszustände zu gelangen (= IC-Argument).

Auch die Fähigkeit des explorativen Verhaltens soll beitragen, die Entstehung von IC-Strukturen zu erklären. So könnten sich infolge von Veränderungen im Skelettbau (man kann beispielsweise an die Verlängerung des Giraffenhalses denken) die damit verbundenen Muskelstränge, Nervenbahnen und Blutgefäße aufgrund von deren explorativen Verhalten quasi automatisch anpassen. Beispiele dieser Art treffen die IC-Argumentation jedoch aus zwei Gründen nicht: 1. Sie beschreiben nicht den Vorgang der *Entstehung einer neuen Funktion*. So kann man beispielsweise die Entstehung von Fingern bei den Tetrapoden (Vierbeinern) nicht durch bloße Variation von Knochen und passendes exploratives Verhalten der damit zusammenhängenden Gewebe erklären. 2. Die von KIRSCHNER & GER-

HART betrachteten Systeme (wie im obigen Beispiel der Hals) sind viel zu komplex und insgesamt zu wenig durchschaut, um mit ihnen scharf argumentieren zu können. BEHE hat wiederholt ausdrücklich darauf hingewiesen, dass man abgegrenzte, *einzelne* Subsysteme betrachten muss, um das IC-Argument anwenden zu können.

Dazu kommt, dass „exploratives Verhalten“ selbst auf Vorprogrammierung hinweist. Denn solche Prozesse müssen Regeln folgen, damit sie zu sinnvollen Abläufen führen. Woher kommen diese Regeln? Bloße Mechanismen können keine Regeln schaffen. Das Argument des explorativen Verhaltens schwächt das IC-Argument nicht und wirft stattdessen neue Fragen auf.

Mikroevolution und Systeme, die nicht IC sind

Manche Beispiele, mit denen der evolutive Aufbau eines IC-Systems demonstriert werden soll, fallen in den Bereich der Mikroevolution. BEHE (2002) nennt als Beispiel eines Kritikers zwei ähnliche Varianten des Enzyms Isocitrat-Dehydrogenase. Das eine benutzt den Cofaktor NAD, das andere NADP, welches gegenüber NAD zusätzlich noch eine Phosphatgruppe besitzt, sonst aber sehr ähnlich ist. Die unterschiedliche Spezifität für NAD oder NADP kann durch wenige Mutationsschritte erreicht werden. Ein solcher Vorgang ist offenkundig Mikroevolution (zur Unterscheidung von Mikro- und Makroevolution siehe JUNKER [2006]). Außerdem beschreibt er nicht die Entstehung einer IC-Struktur.

MILLER (2000, 151) nennt die Entstehung des Frostschutzproteins bei antarktischen Fischen als Beispiel für eine evolutive Entstehung einer IC-Struktur. Ein einzelnes Protein erfüllt aber nicht die IC-Definition, da das Kennzeichen der Interaktion fehlt.⁵⁴ BEHE (2007) selbst führt es als Musterbeispiel dessen an, was ungerichtete Prozesse durchaus zustandebringen können. Das Beispiel ist daher untauglich.

Sprunghafte Entstehung einer IC-Struktur?

Gegen das IC-Argument könnte auch der Einwand erhoben, dass eine IC-Struktur *sprunghaft*-evolutionär entstehen könne. Diese Möglichkeit wird, wenn auch nicht als Antwort auf das IC-Argument, von Evo-Devo-Forschern diskutiert (vgl. JUNKER 2007). Doch eine auch nur ansatzweise experimentell nachvollziehbare nicht-gradualistische naturalistische Erklärung für die Entstehung komplexer synorganisierter Strukturen ist nicht bekannt (JUNKER 2006; 2007). Und selbst wenn größere Schritte zugelassen würden, würde dies nichts daran ändern, dass IC-Strukturen durch *mehrere* (evtl. größere) Schritte von hypothetischen selektierbaren Vorstufen getrennt sind (siehe dazu den Abschnitt „Wissenschaftstheoretische Fragen“ weiter unten). Hier bietet

sich aber eine Widerlegungsmöglichkeit des IC-Arguments an. Denn ob graduell oder sprunghaft: Gelingt der Nachweis einer naturalistischen Entstehung einer IC-Struktur, ist das IC-Argument widerlegt (wenn auch eine evolutive Entstehung damit nicht bewiesen wäre). Derzeit ist die Annahme von Sprüngen, die auf einen Schlag zu einer IC-Struktur führen sollen, mit dem Schöpfungspostulat vergleichbar.

Belousov-Zhabotinsky-Reaktion

SHANKS & JOPLIN (1999) beschreiben die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion (BZ-Reaktion) als Beispiel für die natürliche Entstehung einer IC-Struktur. Es handelt sich dabei um eine sich selbst organisierende chemische Reaktion. BELOUSOV hat Malonsäure bromiert unter Katalyse von Cer-Ionen und dabei eine oszillierende Reaktion ausgelöst, dabei bilden sich alternierende Farbumschläge, solange sich das Reaktionssystem weit vom Gleichgewicht entfernt befindet. SHANKS & JOPLIN (1999, 272f.) sind der Auffassung, dass die BZ-Reaktion BEHES Kriterien für nichtreduzierbare Komplexität erfüllen, da sie viele Elemente und Abläufe enthalte und weil das charakteristische Verhalten des Systems unterbrochen werden, wenn ein Element in einer kritischen Phase der Reaktion entfernt wird. Nichtreduzierbare Komplexität in einem sich selbst organisierenden System werde durch natürliche Mechanismen ohne eine *deus ex machina* erzeugt. Das Verhaltensmuster dieses chemischen Systems resultiere ausschließlich aus dem Zusammenwirken chemischer Gesetze und der Anfangsbedingungen.⁵⁵

Die BZ-Reaktion erfüllt BEHES Kriterien als IC-System insofern, als die oszillierende Reaktion ein Mehrkomponentensystem ist. Versteht man die Oszillation als Funktion des Systems, so trifft weiter zu, dass diese nur aufrechterhalten bleibt, solange alle Komponenten (und noch weitere Bedingungen) gegeben sind. Allerdings ist der Vergleichspunkt mit biologischen Systemen aus mindestens zwei Gründen nicht getroffen. Zum einen schließt das IC-Argument ja nicht aus, dass die Funktion eines Systems mechanistisch *beschrieben* werden kann. Das *Verhalten* eines oszillierenden Systems kann heute weitgehend anhand chemischer Erfahrungen und der Anfangs- und Randbedingungen *beschrieben und nachvollzogen* werden. Das *Zustandekommen* dieses Systems – und darauf kommt es beim IC-Argument ja an – kann der Chemiker zwar im Labor nachstellen und experimentell reproduzieren. Aber damit ist es der agierende Chemiker, der im Labor die Bedingungen für die Aufrechterhaltung („sustain“) des Reaktionssystems technisch herbeiführt. Die Frage der *Entstehung* stellt sich für den Chemiker aber bei der BZ-Reaktion gar nicht. Insofern wird durch die Beschreibungen der BZ-Reaktion von SHANKS & JOPLIN (1999) das IC-Argument nicht berührt. Zum anderen kann man die Oszillation kaum mit den hochgradig teleologischen (oder teleologisch wirkenden) lebendigen Systemen vergleichen. Der Komplexitätsgrad ist bei letzteren

zudem ein völlig anderer.

Bereits sehr früh hat man bemerkt, dass das oszillierende Verhalten der BZ-Reaktion Ähnlichkeiten mit Systemen aufweist, die man in der Biologie findet. So wurden und werden die mathematischen Modelle zur Beschreibung und Simulation von BZ-Reaktionen auch auf biologischen Phänomene angewendet. Man kann biologische Systeme mit denselben Modellen *beschreiben*. Das muss deutlich unterschieden werden von einem Verständnis der Genese und Etablierung eines Systems – und darum geht es beim IC-Argument.

Die Komplexitätstheorie (SHANKS & JOPLIN 1999, 275) könnte ein hilfreiches Werkzeug zu sein, um Phänomene (hier in Chemie und Biologie) zu beschreiben und modellieren und sie kann damit dazu beitragen, diese zu verstehen.⁵⁶ Zum Verständnis der Entstehung von chemischen, biochemischen und auch biologischen Systemen trägt sie jedoch nichts bei.

Vergleichende Biologie als Argument

Bei der Diskussion um die Entstehung von IC-Systemen sind wir in den vorangegangenen Betrachtungen oft auf eine vergleichend-biologische Argumentation (vor allem Sequenzähnlichkeiten) gestoßen. Beispielsweise schreibt USSERY (2004, 52): „Sequence comparison is where the clearest evidence for evolution lies, and that is precisely where Behe does not look.“⁵⁷ Vergleichend-biologische Betrachtungen (das Auftreten von Homologien) liefern aber keinen Schlüssel für *Mechanismen*; das IC-Argument wird durch Argumente aus der Vergleichenden Biologie gar nicht tangiert. Denn beim IC-Argument geht um die Mechanismenfrage. Oder wie BEHE (2000b) betont: „Evidence of common descent is not evidence of natural selection.“ Allgemeiner kann man sagen: Hinweise auf gemeinsame Abstammung sind keine Hinweise darauf, dass diese durch ausschließlich natürliche, ungerichtete Prozesse verlief (wenn es sie denn überhaupt gab). Diese eigentlich selbstverständliche Unterscheidung wird von vielen Kritikern des IC-Arguments nicht beachtet. BEHE hat mehrfach betont, dass er Evolution als Ablauf nicht in Frage stelle (besonders klar in BEHE 2007).

Eine vergleichend-biologische Begründung steckt auch in der Aussage von KORTHOFF (2007), die Existenz unterschiedlich komplexer Flagellen würde zeigen, dass eine Evolution komplexer Flagellen aus einfacheren prinzipiell möglich sei.⁵⁸ Der Formenvergleich könnte jedoch genauso gut als Grundlage für die Interpretation im Sinne einer Abfolge von *Vereinfachungen* dienen. So oder so geben Formenvergleiche keine Auskunft über *Mechanismen*, um die es aber gerade beim IC-Argument geht.

Schlussfolgerungen

Eine Reihe von Vorschlägen der Entstehung von IC läuft auf die Vorstellung hinaus, ein IC-System könne

nebenbei entstehen, d. h. als Nebenprodukt eines Prozesses, der unter Selektionsdrücken stand, die eigentlich in eine andere Richtung wiesen. Das gilt für die Idee der Kooption, den „Umweg“ über Redundanz oder auch den Weg über Genduplikationen. Damit entfällt die Notwendigkeit, Selektionsbedingungen plausibel machen zu müssen. Doch dies wird damit erkauft wird, dass man hochgradig spekulieren muss. Ohne experimentelle Belege sind vorgeschlagene Entstehungswege mehr oder weniger phantasievolle Geschichten. Sie mögen den Effekt haben, Forschung anzuregen, sie können selber aber nicht als Erklärungen gelten. Die hochgradige Komplexität der Organismen gibt einer solchen bestenfalls vorwissenschaftlichen Argumentationslinie den nötigen Rückhalt, weil sich darin genügend Ansätze für indirekte Wege finden. Die vernetzte Komplexität macht es auf der anderen Seite auch schwierig auf aufwändig, das IC-Argument in konkreten Fällen zu prüfen. Doch eine Prüfung ist grundsätzlich möglich. Das beweisen schon die vielen Versuche, das IC-Argument zu entkräften.

Manche Vorschläge zur Entstehung von IC verfehlen das Kriterium für IC. Das gilt für Beispiele vielfach zusammengesetzter Einzelsysteme (wie etwa das Beispiel der Lunge und des Fortbewegungsapparats), für die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion, für die Computersimulation von SADEDIN oder auch für Systeme die das IC-Kriterium gar nicht erfüllen. Hier wird die Latte deutlich zu tief gehängt und das Erklärungsziel nicht einmal ernsthaft angestrebt.

Schließlich entfallen alle Argumente als Erklärung, die auf vergleichenden Betrachtungen beruhen. Denn beim IC-Argument geht es um *Mechanismen*; diese können durch bloße Vergleiche nicht ermittelt werden.

Es kann festgehalten werden, dass die Versuche, das IC-Argument zu widerlegen, bislang gescheitert sind. Das Argument kann gegen viele Einwände behauptet werden. Vorgeschlagene Entstehungswege sind unrealistisch, spekulativ oder führen nicht zu IC.

Wissenschaftstheoretische Fragen

Das IC-Konzept spielt eine bedeutende Rolle im Rahmen des Arguments für Intelligent Design (ID-Argument). Denn der Nachweis von IC gilt für viele ID-Befürworter als ein positives Argument für das Wirken eines Urhebers. Einige damit zusammenhängende wissenschaftstheoretische Fragen sollen in Kurzform angesprochen werden. Für eine ausführliche Diskussion und Kritik des ID-Ansatzes wird auf JUNKER (2008) verwiesen.

Das IC-Argument hat drei Abstufungen (vgl. Abb. 3). Zum einen muss festgestellt werden, ob ein in Rede stehendes System überhaupt nichtreduzierbar komplex

ist. Wenn das nachgewiesen werden kann, stellt sich die weitere Frage, ob die Entstehung dieser Struktur durch natürliche evolutive Prozesse nachvollzogen werden kann, also ob das IC-Argument vertretbar ist. Darauf aufbauend stellt sich die dritte Frage, ob der fehlende Kenntnis evolutiver Prozesse ein Argument für das Wirken eines Urhebers darstellt; kurz: Folgt aus dem IC-Argument ID? (Abb. 3) Die Antwort soll in Kurzform gleich gegeben werden. 1. Ob ein System IC ist, ist prüfbar; evtl. muss die Antwort mangels Kenntnissen offen bleiben. 2. Ob das IC-Argument zutrifft, ist prüfbar und widerlegbar, allerdings gilt es nur vorbehaltlich neuer Erkenntnisse. Aufgrund dieses Vorbehalts gilt 3.: Aus dem Nachweis von IC und aus dem IC-Argument folgt nicht zwingend ID. Die Option ID bleibt aber solange die einzige Erklärung für die Existenz eines IC-Systems, bis ein natürlicher Evolutionsprozess nachgewiesen ist. Nachfolgend soll dies näher erläutert und sollen weitere wissenschaftstheoretische Fragen zum IC-Argument behandelt werden.

Ist das Kennzeichen „IC“ empirisch prüfbar? Ob eine Struktur nichtreduzierbar komplex ist, ist empirisch im Prinzip einfach prüfbar. Man kann jedes einzelne Element des Systems aus dem System entfernen und untersuchen, ob die Funktion wenigstens teilweise noch erhalten bleibt. Wenn ein einfacheres System noch die Grundfunktion besitzt, muss geprüft werden, ob ein IC-Kernbereich nachgewiesen werden kann.

Ist das IC-Argument widerlegbar? Das IC-Argument lautet nach BEHE, dass IC-Systeme nicht durch kleinschrittig verlaufende Evolution entstehen können. Allgemeiner lautet das IC-Argument, dass überhaupt keine Evolution von IC-Strukturen möglich ist, weder durch Darwinsche Mechanismen, noch durch irgendwelche andere Evolutionsmechanismen. Das wiederum gilt ID-Befürwortern als Hinweis auf das Wirken eines Urhebers (vgl. Abb. 3).

Viele Kritiker halten den ID-Ansatz für unwissenschaftlich, weil ID allgemein nicht widerlegbar sei. Abgesehen von der nicht trivialen Problematik der Abgrenzung von Wissenschaft und Nichtwissenschaft (vgl. MEYER 2002) wird diese pauschale Behauptung durch solche Kritiker widerlegt, die ID-Argumente zu entkräften oder zu widerlegen versuchen. Dies gilt auch für das IC-Argument. Im Hauptteil dieses Artikels wurden Argumente erläutert, die als Widerlegungsversuche in die Diskussion eingebracht wurden. Das sind nicht wenige Argumente. Damit ist klar, dass die Behauptung der Nichtreduzierbarkeit einer Struktur und das darauf Bezug nehmende IC-Argument prüfbar und je nach Ergebnis der Prüfung auch widerlegbar ist. Das IC-Argument kann dadurch widerlegt werden, dass man nachweist, dass eine betrachtete Komplexität kumulativ, auf dem Umweg über redundante Komplexität, durch eine glückliche Fügung (sprunghaft) oder auf einem anderen experimentell nachvollziehbaren Wege erreichbar ist.

Wenn kritisch hinterfragt wird, ob das IC-Argument

widerlegbar ist, muss man umgekehrt auch die Frage stellen, ob die Behauptung, eine IC-Struktur sei *durch Evolutionsmechanismen* entstanden, widerlegbar ist. Wie sollte dies möglich sein? Man kann bei jedem Scheitern eines Versuches, IC durch bekannte Evolutionsmechanismen zu erklären, auf noch unbekannte Mechanismen verweisen. Das vorläufige Scheitern, eine IC-Struktur gradualistisch-evolutionär zu erklären, ist für ORR tatsächlich kein Anlass, eine graduelle Evolution zu hinterfragen: „... wir haben keine Garantie dafür, dass wir die Geschichte eines biochemischen Stoffwechselweges rekonstruieren können. Aber auch wenn wir das nicht können, kann seine nichtreduzierbare Komplexität nicht *mehr* als Argument gegen seine graduelle Evolution gelten als die nichtreduzierbare Komplexität eines Programms – also überhaupt nicht“ (ORR 1996/1997).⁵⁹ (Dass der Vergleich mit Computerprogrammen an der Sache vorbei geht, wurde weiter oben erwähnt und begründet.) So gesehen ist das IC-Konzept grundsätzlich leichter angreifbar als die Behauptung, natürliche Mechanismen hätten eine bestimmte Struktur hervorgebracht.

Die Schwierigkeit der Widerlegung liegt darin begründet, dass wir es mit vergangenen Prozessen zu tun haben. Eine strikte Falsifizierung von Theorien, die vergangene Prozesse beschreiben, ist nur schwer möglich ist, meistens können nur Plausibilitätsbetrachtungen angestellt werden (zur Begründung sei auf JUNKER [2005] verwiesen).

Beruhet das IC-Argument auf Nichtwissen? Ist zu wenig über die Evolutionsfähigkeit bekannt? Wie bei Argumenten für ID allgemein kann auch im Falle von IC argumentiert werden, dass noch zu wenig über die Evolutionsfähigkeit der Lebewesen bekannt sei, um eine nicht-teleologische Entstehung von IC nachzuweisen. Das ist richtig, widerlegt aber nicht das IC-Argument. Denn wie für alle empirisch begründeten Aussagen gilt auch für Behauptungen von IC und für das IC-Argument, dass sie vorläufig sind. Es wird sich zeigen müssen, ob weitere Erkenntnisse das IC-Argument in konkreten Fällen stützen oder schwächen werden. Damit kann auch dem Einwand entgegnet werden, unsere Kenntnisse über die Entstehung evolutionärer Neuheiten seien zu gering, um das IC-Argument sinnvoll vertreten zu können. Der Verdacht auf IC ist in vielen Fällen offensichtlich; das sollte genügend Motivation bieten, diesem Verdacht nachzugehen. Der Hinweis, man wisse möglicherweise zu wenig über die Evolutionsfähigkeit und die Struktur-Funktions-Beziehungen der Lebewesen, impliziert eine Prüfbarkeit des IC-Arguments. Weitere Forschung wird zeigen müssen, ob das Argument haltbar ist.

Das IC-Argument stützt sich auf Kenntnisse über den Aufbau der Lebewesen, sei es im molekularen oder im anatomischen oder einem anderen Bereich. Mangels Kenntnissen konnte DARWIN über IC im molekularen Bereich nichts wissen. Für ihn konnte es daher in diesem Bereich das IC-Argument nicht geben, daher konnte damals das IC-Argument nicht so gut begrün-

det werden wie heute. Damit ist klar: *Das IC-Argument stützt sich gerade nicht auf Nichtwissen und füllt nicht die Lücken unserer Kenntnisse aus*, sondern kann umso besser begründet werden, je mehr ein Gegenstand erforscht wurde und je dauerhafter es sich Falsifizierungsversuchen erfolgreich erwehrt hat. Weitere Forschung kann aber auch das Gegenteil zur Folge haben und bisherige Erfolge zunichte machen (s.o.). BEHE weist im Nachwort zur Auflage von 2006 von „*Darwin's Black Box*“ darauf hin, dass zunehmendes Wissen über noch viel größere Komplexität das IC-Argument weiter bekräftigt habe (ebenso in BEHE 2007).

In einer zweiten Hinsicht wird das IC-Argument durch Wissen gestützt, nämlich durch unsere Kenntnisse über Variationsmechanismen. Die zunehmenden Kenntnisse haben keine Zunahme im Verständnis der Evolution von IC-Strukturen gebracht. Dies sollte durch den Hauptteil „Kritik“ dieses Artikels deutlich geworden sein. Natürlich kann sich das jederzeit ändern, daher kann das IC-Argument nicht bewiesen werden.

Kann für die Entstehung von IC-Strukturen ein Mechanismus angegeben werden? Die Forderung nach einem *Mechanismus* für die Entstehung von IC-Strukturen ist fragwürdig. Denn das IC-Argument bedeutet gerade wie alle Argumente pro ID, dass alle Mechanismen *unzureichend* sind. Eine Ausnahme könnte die Idee einer vorprogrammierten Evolution sein („front loading“ nach GENE 2007). Ein Vergleich macht diesen Sachverhalt klar: Wenn untersucht werden soll, ob ein Toter eines natürlichen Todes gestorben ist oder ermordet wurde, wäre es absurd, für die „Mordtheorie“ nur einen *Mechanismus* vorlegen zu wollen. Genauso unsinnig wäre es, einen ungerichteten Mechanismus für die Entstehung eines technischen Gerätes zu fordern. Beim IC-Argument kann es *prinzipiell* nur darum gehen, Daten zusammenzutragen, die gegen eine Evolvierbarkeit sprechen. Es geht also um Deutung von Indizien, nicht um die Suche nach einem Mechanismus. Auch diese Frage wird in JUNKER (2008) ausführlicher behandelt.

Kann bewiesen werden, dass IC nicht evolvierbar ist? Vermutlich ist dies nicht möglich, denn dazu müsste man alle denkbaren Entstehungswege kennen. Daher können nur Plausibilitäten abgeschätzt werden, was immer auch mit subjektiven Komponenten verbunden ist. Um zu einer Einschätzung kommen zu können, muss ein Maß für die nichtreduzierbare Komplexität gefunden werden und es muss geklärt werden, welches Ausmaß an Komplexitätssteigerung unter Erhalt der Konkurrenzfähigkeit durch bekannte Evolutionsfaktoren *von einer Generation zur nächsten* möglich sind. (Die Forderung „von einer Generation zur nächsten“ ist nötig, weil die Organismen nicht einige Generationen wegen Umbau schließen können, wie Günther OSCHER treffend formuliert hat.) Beispielhaft wird dies in JUNKER & SCHERER (2006, 155ff.) beim Bakterienmotor durchgeführt. Ein weiteres Beispiel diskutiert SCHERER (1995). Die ID-Kritiker haben diese Beispiele

nach meiner Kenntnis zwar gelegentlich erwähnt, ohne aber auf die Argumentation im einzelnen einzugehen. Es wäre leicht möglich, genau anzugeben, an welcher Stelle der dort präsentierten Argumentationskette Fehler begangen werden oder anfechtbare Schlussfolgerungen gezogen werden.

Doch man kann sich immer auf den Standpunkt zurückziehen, es könnte noch unentdeckte Evolutionsprozesse geben, die die natürliche Entstehung von IC erklären (s. o.). Daher hat DARWIN mit seinem eingangs genannten Zitat nicht recht: „Wenn gezeigt werden könnte, dass irgendein komplexes Organ existiert, das nicht durch zahlreiche aufeinanderfolgende geringfügige Änderungen gebildet werden konnte, würde meine Theorie völlig zusammenbrechen.“ Ein solcher Unmöglichkeitsbeweis ist in einer historischen Wissenschaft nicht stringent führbar. Dagegen könnte der Nachweis, dass IC-Strukturen evolutiv entstehen könnten – der „Möglichkeitsbeweis“ –, prinzipiell geführt werden, wenn entsprechende Daten gewonnen werden.

Schließt der Nachweis von IC den Beweis von ID ein? Ohne Abkürzungen gefragt: Ist der Ausschluss evolutiver Prozesse ein Argument für das Wirken eines Urhebers? Wenn dieser Ausschlussbeweis geführt werden könnte und ID nicht von vornherein ausgeschlossen wird, dann würde ID als einzige Möglichkeit bleiben. Die erste Bedingung ist aber nicht erfüllbar, die zweite eine Frage der weltanschaulichen Vorfixierung. Wie gezeigt, kann die evolutive Entstehung einer IC-Struktur nicht zwingend ausgeschlossen werden. Daher kann der Nachweis von IC nur ein *Verdachtsmoment* liefern, dass die betreffende Struktur auf einen Urheber zurückzuführen ist. ID kann zwar im strengen Sinne nicht widerlegt, jedoch als überflüssig erwiesen werden, indem ein evolutiver Weg nachgewiesen wird. Nach dem ID-Ansatz wird aber nicht nur behauptet, dass eine Struktur ursprünglich geschaffen wurde, sondern auch, dass man das an bestimmten Kennzeichen erkennen oder plausibel machen kann. Ein solches Kennzeichen ist IC, auf welches das IC-Argument aufgebaut ist. Wenn das IC-Argument wirkungsvoll entkräftet werden kann, hat sich der ID-Ansatz an dieser Stelle erübrigt. Es sind also nur folgende Alternativen möglich: Der Fortschritt der Forschung führt zur Schwächung oder Widerlegung des IC-Arguments oder er führt (durch Zunahme der Detailkenntnisse über das betreffende System) zu einer *Stärkung* des Arguments. Eine *Widerlegung* des IC-Argument (und damit auch des betreffenden ID-Arguments) ist also möglich, ein endgültiger Beweis auf dem Wege naturwissenschaftlicher Ergebnisse dagegen nicht.

Viele ID-Befürworter argumentieren hier mit einem Analogieschluss. Wir wissen, dass IC durch Einsatz von Intelligenz hergestellt werden kann, sei es in Laborstudien oder im technischen Bereich. Dieses Wissen wird aufgrund vergleichbarer Konstellationen auf die unbekannte und nicht direkt erforschbare Entstehung von IC-Strukturen in Lebewesen angewendet. Eine Analy-

se des Analogieschlusses mittels IC zeigt jedoch, dass auch dieser keinen zwingenden Schluss auf ID ermöglicht (JUNKER 2008).

Verhindert der Verweis auf IC Forschung? Am ID-Ansatz wird weiter kritisiert, er verhindere Forschung, weil bei offenen Fragen auf einen Urheber verwiesen werde, statt die offenen Fragen durch Forschung einer Antwort zuzuführen. In meinem Beitrag über „Intelligent Design“ (JUNKER 2008) gehe ich auf diesen Einwand ausführlich ein. Am Beispiel von IC kann man ihn jedoch besonders gut entkräften. Die Feststellung von IC steht nicht am Anfang einer Untersuchung, sondern kann erst nach eingehender Forschung begründet werden. Am Anfang steht die *Hypothese*, eine Struktur könnte IC sein. Diese Hypothese muss geprüft werden; der Nachweis von IC kann nur durch Forschung erfolgen. *IC kann sich durch weitere Forschung aber auch als Schein erweisen*. Weitere Forschung kann also die Plausibilität des Vorliegens von IC verringern; sie kann sie aber auch erhöhen. Dasselbe gilt für das IC-Argument.

LÖNNIG (2004) weist darauf hin, dass viele biochemische Merkmale bzw. Prozesse in den Lebewesen quer durch das Organismenreich ausgesprochen konservativ sind und präsentiert dazu eine Reihe von Beispielen aus der Fachliteratur. Viele grundlegende Bausteine und Prozesse sind unter den Vielzellern weit verbreitet, stellt auch CONWAY MORRIS (2000, 1) fest. Über diese biochemische Stasis zeigen sich viele Autoren (wie auch CONWAY MORRIS) überrascht; sie ist aber mit dem IC-Argument vorhersagbar, weil es eine begrenzte Wandelbarkeit der biologischen Strukturen impliziert.⁶⁰ Daraus ergibt sich auch eine Prüfmöglichkeit für IC: Wenn IC-Strukturen nicht graduell und un gelenkt evolvierbar sind, ist biochemische Stasis zu erwarten. Und dass Stasis auf morphologischer Ebene ein regelmäßiger Befund ist, ist schon lange kein Geheimnis. GOULD & ELDREDGE (1993) stellen fest, dass morphologische Stabilität auch bei Organismen festzustellen sei, die erhebliche klimatische Schwankungen durchleben mussten, so dass Stasis als „aktives Phänomen“ betrachtet werden müsse. Auch das könnte als Widerspiegelung von IC gedeutet werden, da funktionierende IC-Systeme stabil sein müssen.

Alles in allem ist das IC-Argument also kein „Forschungskiller“, im Gegenteil, es regt Forschung an und bietet für Befunde aus verschiedenen Disziplinen eine Erklärung. Damit sind wir beim nächsten Einwand.

Erkenntniszuwachs und das IC-Argument: Fördert das IC-Konzept Forschung? Eingangs wurde DARWIN zitiert, er kenne keine Beispiele von IC-Strukturen. Er schien es aber für möglich zu halten, dass sich das in Zukunft ändert und er formulierte dies – wie oben zitiert – sogar als Falsifizierungsmöglichkeit für „seine Theorie“. Der Titel von Michael BEHEs Buch soll nun gerade zum Ausdruck bringen, dass sich die Zeit seit DARWIN in genau diese Richtung verändert habe. Für DARWIN waren die zellulären Vorgänge weitgehend eine „Black Box“. Welche Probleme darin für eine evo-

lutive Erklärung ihrer Entstehung liegen könnten, war ihm unbekannt. Wissenszuwachs hat in diesem Bereich aber nicht zu einer Lösung der Ursprungsfrage geführt, sondern die Probleme oft erst besonders deutlich werden lassen, und diese Probleme wurden mit zunehmender Kenntnis nicht kleiner. In BEHEs (2004, 367) Worten: „Vor 50 Jahren schien die Zelle viel einfacher zu sein und in unserer Unkenntnis war es damals einfacher, Darwinsche Prozesse dafür verantwortlich zu machen. Aber mit dem Fortschritt der Biologie verschwand die Vorstellung von Einfachheit und die Idee des Design wurde immer zwingender.“⁶¹ Er zitiert den Zellbiologen und bekannten Lehrbuchautor Bruce ALBERTS, wonach die Zellen immer wieder unterschätzt worden seien, und dass dies zweifellos auch für die heutige Zeit zutrefte. Auch für das Paradebeispiel für nichtreduzierbare Komplexität, die Bakteriengeißel, ist für BEHE die Entwicklung in diese Richtung gelaufen: „In den letzten Jahren hat sich herausgestellt, dass die Bakteriengeißel noch ausgeklügelter ist als früher gedacht“ (BEHE 2004, 360).⁶² Die moderne Forschung hätte den Design-Gedanken motiviert statt ihn zu zerstreuen. GENE (2007) zeigt dies in „The Design Matrix“ eindrucksvoll. Forschung hat also IC mehr und mehr zutage gefördert, und dieses Konzept wiederum regt insofern Forschung an, als es genaue Analysen motiviert (damit soll nicht bestritten werden, dass es auch andere Motivationen für solche Analysen gibt!). Wird dagegen die Möglichkeit von IC negiert, besteht die Gefahr, dass die evolutionstheoretischen Erklärungsprobleme unter den Tisch gekehrt werden, statt dass man sich ihnen stellt.

Natürlich kann sich dies alles in Zukunft ändern. Aber als Stand der Dinge ist diese Einschätzung durch Daten begründet. Weitere Ergebnisse können das IC-Argument als unhaltbar erweisen, es kann aber auch sein, dass es gestärkt wird (s. o.).

Ist der Bezug auf einen Designer erlaubt? Das Argument, mit dem IC-Argument wolle man auf einen Urheber hinweisen oder gar beweisen, wird häufig abgelehnt, weil damit ein Schöpfer ins Spiel gebracht werde, dessen Aktionen wissenschaftlich nicht fassbar seien. So schreibt HAROLD: „We should reject, as a matter of principle, the substitution of intelligent design for the dialogue of chance and necessity (Behe 1996); but we must concede that there are presently no detailed Darwinian accounts of the evolution of any biochemical system, only a variety of wishful speculations“ (zit. in BEHE 2004, 356). Obwohl HAROLD einräumt, dass die Frage nach der Entstehung von IC ungeklärt ist, schließt er ID *von vornherein* aus. Dies kann nur durch eine Vorfestlegung begründet werden, nicht unter Berufung auf empirische Daten. Durch eine solche Vorfestlegung wird die Grenze zu einer nur philosophisch begründbaren Weltanschauung überschritten. Auf diese Problematik gehe ich in JUNKER (2008) ausführlich ein. In aller Kürze: Ein Designer kann nicht Teil einer naturwissenschaftlichen Theorie sein, sondern es ist bestenfalls möglich, Designer-Spuren nach klar vorgegebenen

Kriterien nachzuweisen. Die Interpretation dieser Spuren erfordert ein Verlassen des naturwissenschaftlichen Bereichs.

Schlussfolgerung: Wie kann die Evolvierbarkeit von IC bestätigt oder widerlegt werden? Die Evolvierbarkeit von IC könnte in Zukunft durchaus nachgewiesen und das darauf Bezug nehmende IC-Argument geschwächt oder widerlegt werden. Die Widerlegung ist erfolgt, wenn nachgewiesen werden kann, dass IC-Systeme durch natürliche evolutive Prozesse entstehen können. Denn das Wirken eines Designers wäre dann zwar noch denkbar, jedoch zum Verständnis überflüssig. Es gibt es zwei Möglichkeiten, dass dieser Fall eintritt:

1. Es wird gezeigt, dass eine IC-Struktur ohne Funktionsverlust schrittweise reduzierbar ist, d. h. dass es sich bei der betreffenden Struktur nicht um nichtreduzierbare, sondern um kumulative Komplexität handelt (vgl. Einleitung). Wie weiter oben bereits erwähnt, ist es nicht erforderlich, dies für jede Struktur nachzuweisen, die nichtreduzierbar komplex zu sein scheint. Wenn dieser Nachweis wenigstens einmal oder einige wenige Male gelingt, so kann als wahrscheinlich gelten, dass es auch für nicht untersuchte *vergleichbar komplexe* Strukturen ebenfalls möglich ist.

2. Es wird gezeigt, dass eine IC-Struktur durch bekannte Evolutionsmechanismen ohne Eingriff eines Designers entstehen kann.

Allgemeine Schlussfolgerungen

In Abb. 3 wurden drei aufeinander aufbauende Schritte der Argumentation mit nichtreduzierbarer Komplexität dargestellt. Es wurde gezeigt, dass die ersten beiden Schritte prüfbar sind. Die Eigenschaft „IC“ und das darauf Bezug nehmende IC-Argument sind prüfbar und widerlegbar. Eine zwingende Schlussfolgerung auf das Wirken eines Designers ist daraus aber nicht ableitbar (Stufe 3 in Abb. 3), jedoch dann naheliegend und plausibel, wenn andere Möglichkeiten trotz aller Bemühungen scheitern.

Die Diskussion hat gezeigt, dass das IC-Argument (Stufe 2 in Abb. 3) in differenzierter Form formuliert werden muss und nicht einfach prüfbar ist. Viele mögliche evolutive Entstehungswege von IC-Strukturen müssen geprüft werden, was im Einzelfall sehr aufwändig sein kann. Aufgrund der Komplexität lebendiger Strukturen, aufgrund der verschachtelten Wechselbeziehungen und Redundanzen dürften auch abgegrenzte Teilsysteme kaum je wirklich nichtreduzierbar komplex sein. Die Argumentation muss daher teilweise mit theoretischen Vereinfachungen erfolgen. Da nach dem IC-Argument *sensu* BEHE eine vom IC-Systems abweichende Funktionalität einfacherer Vorstufen oder von Einzelelementen berücksichtigt wird, stellt sich die

Aufgabe, Basisfunktionszustände so genau wie möglich zu bestimmen und die Anzahl der Schritte möglichst genau zu ermitteln, die erfolgen müssen, um einen neuen Basisfunktionszustand zu erreichen. Dann können die Wahrscheinlichkeit einer evolutiven Entstehung abgeschätzt werden.

Nach allem Gesagten kann man folgern, dass IC-Systeme nur als *Indikator* für das evolutionstheoretische *Problem* der Entstehung neuer Konstruktionen mit neuartigen Funktionen betrachtet werden können.

Die Feststellung, dass ein System IC ist (Stufe 1 in Abb. 3), steht nicht am Anfang einer Untersuchung, sondern an ihrem vorläufigen Ende. Die Untersuchung ist dann sinnvoll, wenn es einen Anfangsverdacht auf IC gibt. Erst das *detaillierte* Studium eines IC-verdächtigen Systems kann zeigen, ob es wirklich IC ist, und nur die weiter verbesserte Kenntnis der Evolutionsmechanismen kann die Plausibilität einer evolutiven Entstehung einer IC-Struktur begründen, erhöhen oder verringern. Das Ergebnis steht nicht von vornherein fest. Wer die Behauptung von IC aufstellt, lehnt sich – im Bilde gesprochen – nicht zurück und verweist auf Unbekanntes, um dafür einen Lückenbüßer einzusetzen, sondern muss durch Forschung die Behauptung zu begründen versuchen. Die Argumentation mit IC blockiert also Forschung nicht, sondern braucht Forschung.

In einer seiner Antworten auf Kritiker macht BEHE (2000b) einige Vorschläge dazu, wie das IC-Konzept Forschung anregen kann. Zum einen ist es wichtig, nicht nur festzustellen, welche Teile eines Systems zum nichtreduzierbaren Kernbereich gehören, sondern es müssen auch die Teile selbst genauer auf ihre Komplexität hin untersucht werden. Weiter muss danach geforscht werden, woher die Einzelteile eines IC-Systems kommen könnten.

BEHE schlägt weiter vor, IC „evolutionär“ zu definieren, das heißt, nicht den heute vorliegenden *Zustand* eines Systems zugrundezulegen, sondern einen hypothetischen *Entstehungsweg*. Dabei kann geprüft werden, ob jeder Schritt dieses Weges selektierbar ist. Wenn ein System mehrere nicht selektierbare Schritte durchlaufen muss, ist nach heutiger Kenntnis die weitere Evolution verbaut. Zu prüfen ist dabei auch, ob die neutrale Theorie der Evolution weiterhilft (vgl. die Diskussion dazu in JUNKER & SCHERER 2006). Im diesem Sinne schlägt BEHE (2000b) folgende vorläufige Definition eines nichtreduzierbar komplexen Entstehungsweges vor:

Ein nichtreduzierbar komplexer evolutionärer Entstehungsweg beinhaltet einen oder mehrere nicht selektierbare Schritte (d. h. eine oder mehrere notwendige, aber nicht selektierbare Mutationen). Das Maß der nichtreduzierbaren Komplexität bemisst sich an der Anzahl der nicht selektierten Schritte im Entstehungsweg.

Diese Definition hat – so BEHE – den Vorteil, Forschung anzuregen: es müssen genaue, detaillierte evolutionäre Entstehungswege aufgezeigt, Mutationsraten berücksichtigt, und es muss Rechenschaft über Selektionsbedingungen gegeben werden. Darauf aufbauend

können Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen angeschlossen werden.

Die Frage der Beweislast

Im Zusammenhang mit der (unberechtigten) Kritik, das IC-Argument beruhe auf Nichtwissen, wird häufig auch die Frage der Beweislast aufgeworfen. Wer behauptet, ein System sei nichtreduzierbar komplex und nicht durch graduelle oder sprunghafte natürliche Prozesse entstanden (Stufen 1 und 2 in Abb. 3), trage die Beweislast. Er müsse einen alternativen (nicht-evolutionären) Entstehungsweg aufzeigen, wie auf dem Wege von ID das betreffende IC-System entstanden sei.

Die Beweislast trägt derjenige, der das IC-Argument aufstellt, genauso wie derjenige, der nur nicht-teleologische Prozesse für die Entstehung von IC zugrundelegt. Dass es für das IC-Argument gute Argumente gibt, haben BEHE in „*Darwin's Black Box*“ und viele andere in ähnlicher Weise gezeigt; auch der vorliegende Artikel sollte dazu beitragen. Einen definitiven naturwissenschaftlichen Beweis kann es aber nicht geben, da es um Ursprungsfragen geht, in denen nur mit Analogien auf der Basis des empirischen Wissens über gegenwärtige Prozesse argumentiert werden kann. *Auch für die Geltung der Makroevolutionstheorie als Beschreibung vergangener Abläufe können ebenfalls nur Analogieargumente angeführt werden*, indem empirisch nachweisbare Prozesse auf große Zeiträume ausgedehnt werden (immerhin erfolgt eine Extrapolation von größenordnungsmäßig 10^2 auf 10^9 Jahre). Daher trägt nicht nur derjenige die Beweislast, der das IC-Argument als gültig betrachtet, sondern auch derjenige, der die Behauptung aufstellt, un gelenkte evolutionäre Prozesse (ob graduell oder sprunghaft) hätten das Design der Lebewesen hervorgebracht.⁶³ In der Frage der Beweislast besteht folglich eine Pattsituation. Dies stellt sich *in der öffentlichen Wahrnehmung* zwar anders dar, doch ist dies den Mehrheitsverhältnissen im akademischen Bereich geschuldet und nicht in der Sache begründet.

Dank: Zahlreiche wertvolle Hinweise für diesen Artikel erhielt ich von Till BISKUP, Christoph HEILIG, Roderich NOLTE, Markus RAMMERSTORFER und Thomas WASCHKE.

Anmerkungen

¹ „Like Pennock, Miller concocted his own, private definition of irreducible complexity, and then argued against that“ BEHE (2006, 259).

² Weitere Beispiele dieser Art grob fehlerhafter Rezeption von BEHEs Argument: „Behe geht von der Grundannahme aus, dass etwaige evolutionäre Vorgänger ‚irreduzibler‘ komplexer Strukturen – also bloße Teile davon – funktionslos seien und ihnen deshalb kein Selektionsvorteil zufallen könne“ (RHONHEIMER 2007, 79). Das Gegenteil ist richtig.

Ebenso MILLER (2004, 84): „By the logic of irreducible complexity, these individual components should have no

function...“.

FORREST & GROSS (2007, 304) schreiben: „So, it is not true that the individual components of biochemical structures or systems – including Behe’s own exemplar, the blood-clotting cascade – have no other function than that which he chooses to associate with the putative IC system. Thrombin, for example, has functions, including one in the complement system, other than its central role in clotting.“ Behe behauptet aber nicht, dass einzelne Proteine eines IC-Systems keine andere Funktion hätten oder haben dürften. Genauso falsch ist: „Behe’s assumption that there is such a thing as a single function that is permanently and unalterably associated with a particular biochemical system, or with a chemical (or for that matter a morphological) structure...“ (FORREST & GROSS 2007, 303).

THEOBALD (2007) gibt das IC-Argument ebenfalls nicht richtig wieder, wenn er schreibt: „By definition, an irreducibly complex system lacking a part is nonfunctional.“ Er hätte schreiben müssen, dass die Funktion des *Systems* verloren geht. Dasselbe gilt für THORNHILL & USSERY (2000, 111): „The quality of a structure such that at least one of its components is essential, with its loss rendering the whole structure absolutely nonfunctional.“ „*Absolutely*“ ist falsch.

³ „If it could be demonstrated that any complex organ existed, which could not possibly have been formed by numerous, successive, slight modifications, my theory would absolutely break down. But I can find out no such case.“

⁴ „An irreducibly complex biological system, if there is such a thing, would be powerful challenge to Darwinian evolution.“

⁵ „Intelligence is well known to produce irreducibly complex systems (e.g., humans regularly produce machines that exhibit irreducible complexity). Intelligence is thus known to be causally adequate to bring about irreducible complexity. The argument from irreducible complexity’s **explanatory point**, therefore, is that on the basis of causal adequacy, intelligent design is a better scientific explanation than the Darwinian mechanism for the irreducible complexity of biochemical systems“ (Hervorhebung im Original).

⁶ „Many good designs must not be available on the evolutionary landscape *because they involve unbridgeable functional discontinuities*. Obviously jury-rigged arrangements occur instead *because they entail milder transitions*.“

⁷ „Irreducible complexity needs to be contrasted with cumulative complexity. A system is cumulatively complex if the components of the system can be arranged sequentially so that the successive removal of components never leads to the complete loss of function.“

⁸ „To be sure, identifying such indispensable parts is an important step for determining irreducible complexity in practice. But it is not sufficient. Additionally, we need to establish that no simpler system achieves the same basic function“ (DEMBSKI 2004, 5).

⁹ „Despite this diversity, it is clear that all (bacterial) flagella share a conserved core set of proteins. Of the forty or so proteins in the standard flagellum of *S. typhimurium* strain LT2 or *E. coli* K-12, only about half seem to be universally necessary“ (PALLEN & MATZKE 2006, 785).

¹⁰ Nur weil das Blutgerinnungssystem von Delphinen mit einem Protein weniger auskommt, muss das nicht heißen, dass der Mensch auf dieses verzichten kann. Dennoch könnte man argumentieren, dass das Blutgerinnungssystem grundsätzlich um eine Komponente reduzierbar ist. Allerdings wird in einer solchen Argumentation ein biologisches System (hier

das Blutgerinnungssystem) isoliert betrachtet – eine unbiologische Vorgehensweise, denn biologische Systeme müssen im Gesamtkontext eines Organismus gesehen werden; Delphine und Landsäugetiere leben in verschiedenen Umwelten. Das bloße Zählen von Faktoren und Vergleichen greift zu kurz; vielmehr müssen die Systeme zusammen mit ihrem Kontext erst einmal verstanden werden. Erst dann kann man beurteilen, was das Fehlen des XII-Faktors bei Delphinen bedeutet, bzw. warum deren System trotzdem funktioniert. Und erst dann kann man abschätzen, ob die Blutgerinnungssystem-Varianten ineinander überführbar sind. Vor allem geht es beim IC-Argument aber darum, wie das einfachste bekannte System mit der in Rede stehenden Funktion (hier Blutgerinnung) entstanden ist.

¹¹ „A system performing a given basic function is *irreducibly complex* if it includes a set of well-matched, mutually interacting, nonarbitrarily individuated parts such that each part in the set is indispensable to maintaining the system’s basic, and therefore original, function. The set of these indispensable parts is known as the *irreducible core* of the system.“

¹² BEHE weist in „*Darwin’s Black Box*“ darauf hin, dass es in der Fachliteratur kaum Arbeiten gebe, die sich mit der Evolution von biochemischen IC-Strukturen befassen, und bringt dafür eine größere Anzahl von Belegen. Einige Kritiker werfen BEHE vor, dies entspreche nicht den Tatsachen; es gebe vielmehr hunderte, wenn nicht tausende solcher Arbeiten. Dies weist BEHE (2002) jedoch zurück: Es gebe – wie in „*Darwin’s Black Box*“ dargelegt – keine Arbeiten über die *Details* der Evolution von IC-Strukturen mittels gradueller, ungerichteter Prozesse, sondern nur oberflächliche Stories. Daher sei es nicht verwunderlich, dass eine Reihe seiner Kritiker einräumt, dass das Problem der Entstehungsweise von IC-Strukturen nicht gelöst sei.

¹³ „they’re not intended as an analogy of how evolution works.“

¹⁴ „... the McDonald mousetrap series completely fails as an analogy to Darwinian evolution.“

¹⁵ Die „Evolution“ der Mausefalle nach McDONALD ist in zweierlei Hinsicht lehrreich: Sie zeigt einerseits, dass man sich sogar zu Strukturen, von denen man weiß, dass sie zielorientiert konstruiert wurden und dass sie IC sind, plausibel wirkende Geschichten einer graduellen Entstehung ausdenken kann. Andererseits zeigt dieses Beispiel, dass eine detaillierte Betrachtung notwendig ist, um zu erkennen, welches Ausmaß an Änderungen von Schritt zu Schritt erforderlich ist. Die Geschichte wirkt nur solange plausibel, wie man nicht auf die Details achtet.

¹⁶ „We argue here that the redundant complexity observed in real biochemical systems, processes and structures, strongly supports the conclusion that the mousetrap metaphor is a completely inadequate tool with which to conceptualize biochemical complexity“ (SHANKS & JOPLIN 1999, 276).

¹⁷ „The punch-line is, I think, obvious: although this process is thoroughly Darwinian, we are often left with a system that is irreducibly complex.“

¹⁸ „... he explained that incorporating an additional, but inessential, step or part to an existing structure or physiological system would be selectively positive so long as the change provided some improvement, however slight. It would thus favor survival. Thereafter, through other wellknown processes (e.g. mutational loss of some other part of the now-improved system) that increment of function could become indispensable. The change in the system, that is, its evolution, would then have become irreversible. It would now be, as regards that function and as Behe dubbed it, irreducibly com-

plex.“

¹⁹ „Entirely plausible processes exist, therefore, that have been long known in genetics, by which small and gradual changes to an initially simple, functional system can (and do) cause its complexity to increase and, at some point, to become ‘irreducible’.“

²⁰ Auch DRAPER (2002) diskutiert einige Möglichkeiten, wie nichtreduzierbar erscheinende Systeme doch kumulativ entstanden sein könnten, doch seine Überlegungen sind reine Gedankenexperimente, wie er gegen Ende seines Artikels selbst einräumt: „Admittedly, I have given no real life examples“ (S. 17). Aber auf diese käme es gerade an.

²¹ „This model predicts that, by themselves, the parts of IC structures have no past or present selectable functions.“

²² „Thus, IC machines can, and do, evolve as accretions, by step-wise ‘Darwinian’ means. Their individual components are selectable before assembly into the machine.“

²³ Elimination von funktionaler Redundanz thematisieren auch THORNHILL & USSERY (2000, 113) anhand des Beispiels des doppelten Kiefergelenks. Dieses Beispiel trifft das IC-Argument jedoch nicht, weil es sich um ein zusammengesetztes System aus Teilsystemen handelt.

²⁴ Bei vielen Kritikern fragt man sich, ob sie sich überhaupt ernsthaft Mühe gegeben haben, das IC-Argument richtig zur Kenntnis zu nehmen.

²⁵ „However, we know that first the bridge maker makes a structure underneath the arch - perhaps scaffolding or a mound of earth. The stones are laid on this, and the bridge completed. Then once everything is in place and the stones pushing against each other, one can remove the scaffolding underneath and the bridge remains standing. So likewise this is common practice in evolution“ (RUSE 2005, 42).

²⁶ KORTHOFF unterstellt, dass die Einzelteile keine andere Funktion haben dürften – ein Fehler, der bereits eingangs moniert wurde: „Furthermore, he must show that these parts do not have a second function. For, if they have a second function, they are maintained by natural selection.“ Das schließt BEHE bekanntlich nicht aus (vgl. Abschnitt „Funktionsfähige Vorstufen oder Einzelteile“).

²⁷ DEMBSKI (2004, 19f.) kritisiert: „Even though the scaffold can help build the irreducibly complex system, the scaffold is specifically adapted to the basic function of the system it is helping to construct (e.g., the flagellum). What’s more, the only evidence of that basic function is from the irreducibly complex system itself. Thus, for the Darwinian mechanism to produce an irreducibly complex system by means of a scaffold, the system plus scaffold must have served a *different* function up until all the core components of the final irreducibly complex system became available, snapped into place, and formed a functional system. But in that case the scaffold metaphor becomes inappropriate – a scaffold, after all, is for constructing a structure serving a definite function and not for evolving structures whose functions are likewise evolving.“ Vgl. auch DEMBSKI (2002, 252ff.).

²⁸ *What is ‘intelligent’*: a redundant, reducible system that is mutation-tolerant, or a non-redundant, irreducible system that is easily damaged by mutations? You can’t have it both ways“ (KORTHOFF 2007).

²⁹ „The absence of detailed models in the biological literature that employ scaffoldings to generate irreducibly complex biochemical systems is therefore reason to be skeptical of such models.“

³⁰ „It is hallmark characteristic of evolved biochemical systems that there are typically multiple causal routes to a gi-

ven functional end, and where one route fails, another can take over“ (SHANKS & JOPLIN 1999, 277).

³¹ „Perhaps, Behe might want to argue, these sophisticated artifacts, with their redundant back-up systems, constitute a more sophisticated design metaphor by means of which to conceptualize nature.“ - „The trouble here is that naturalistic, evolutionary processes, notoriously, give rise to similar redundancies.“

³² „By viewing the eubacterial flagellum as an isolated outboard motor rather than a multi-functional organelle with no explicit, human-constructed analog, Dembski makes the problem of flagellar evolution artificially and misleadingly difficult“ (MUSGRAVE 2004, 73).

³³ „Assignment of a single function to any set, especially a large set, of interacting macromolecules is arbitrary. Indeed, the opposite condition – a **dense pleiotropy** – has emerged in contemporary, systemic genomics and proteomics, especially among regulatory genes“ (FORREST & GROSS 2007, 304).

³⁴ „Remember that the 'light-sensitive spot' that Dawkins takes as his starting point requires a cascade of factors ... to function.“

³⁵ HANSEN (2003, 83f.) schreibt: „This model [Nilsson & Pelger; ergänzt] assumes that continuous genetic variation arises in a number of defined traits describing the size, shape and optical properties of the involved tissues. It assumes that the variation in each trait is independent of the variation in the other traits, and of the rest of the organism. In essence, it assumes that variation along the entire continuum from the initial sheet of photoreceptors to the final complex eye is made readily available for selection on a step-by-step basis. In fact, as Nilsson and Pelger point out, this makes the model comparable to the evolution of a one-dimensional quantitative character with unlimited variability (i.e. unlimited capability to produce more extreme variants). We may ask how pessimistic it really is to assume that an organ as complex as an eye should have a variational basis that is no more complex than that of simple univariate size trait?“ Und weiter: „Returning to Nilsson and Pelger's analysis of the evolution of the eye, we can identify one source of the immense evolvability of their model as stemming from the division of the eye into a set of characters that are variationally independent both of each other and of the rest of the organism. This is a seemingly innocent, but perhaps very optimistic assumption“ (S. 84). „Another optimistic aspect of the eye model is the assumption of a continuous path of improvement that allows the eye to evolve as if it was a single character“ (S. 91). Das heißt: Der Komplexität und Vernetztheit von organismischen Bauplänen wird nicht Rechnung getragen; solche Modellrechnungen sind daher gemessen an der heute bekannten biologischen Realität unangemessen, ja sie sind im Grunde genommen irrelevant.

³⁶ „It makes evolutionary sense that the cytochrome *bcl* and cytochrome *c* oxidase complexes arose from a primitive quinol terminal oxidase complex via a series of beneficial mutations.“

³⁷ Wertvolle Hinweise und Kritik zu diesen Abschnitt erhielt ich von Prof. Dr. Eberhard BERTSCH, Dr. Harald BINDER, Peter ENGEHAUSEN und Klaus LANGE.

³⁸ „Even within this short time, the evolved systems acquired levels of complexity similar to those of systems commonly cited as examples of irreducible complexity. Irreducibly complex systems produced by the model contained between 6 and 30 parts; the bacterial flagellum requires around 33 parts ...“

³⁹ WEBER (1999, 596) verweist auf auf das Exon-suffling als Quelle für neue Enzyme. Die damit verbundenen Evoluti-

onsprobleme werden in JUNKER & SCHERER (2006, 151ff.) diskutiert.

⁴⁰ „Beyond the error of proclaiming IC un-evolvable, Behe dismisses the demonstrated frequency, in the history of Earth's biota, of gene and whole-genome **duplication** events, followed by diversification of structure and, eventually, of 'function' among the copies so produced. But the combination of **exaptation** and **genetic duplication-divergence**, for which a mass of evidence exists, makes the IC naive“ (FORREST & GROSS 2007, 304).

⁴¹ „To test natural selection requires much more evidence than mere sequence similarity: it requires *experimentation*.“

⁴² „In order to explain how the cascade arose, therefore, an investigator would have to propose a detailed route whereby a duplicated protein turns into a step in the cascade, with a new target, and a new activator.“

⁴³ FORREST & GROSS (2007, 304) zitieren VrBA mit folgender Definition: „Exaptation. A character previously shaped by selection for a particular role (an adaptation) (. . .) later co-opted by selection for a new and still current fitness role.“

⁴⁴ GRIFFITH (2004) zählt sieben notwendige Schritte einer erfolgreichen Kooptation auf:

„(1) Availability: Are the parts needed to evolve an irreducibly complex biochemical system like the bacterial flagellum even available?

(2) Synchronization: Are these parts available at the right time so that they can be incorporated when needed into the evolving structure?

(3) Localization: Even with parts that are available at the right time for inclusion in an evolving system, can the parts break free of the systems in which they are currently integrated and be made available at the "construction site" of the evolving system?

(4) Interfering Cross-Reactions : Given that the right parts can be brought together at the right time in the right place, how can the wrong parts that would otherwise gum up the works be excluded from the "construction site" of the evolving system?

(5) Interface Compatibility: Are the parts that are being recruited for inclusion in an evolving system mutually compatible in the sense of meshing or interfacing tightly so that, once suitably positioned, the parts work together to form a functioning system?

(6) Order of Assembly: Even with all and only the right parts reaching the right place at the right time, and even with full interface compatibility, will they be assembled in the right order to form a functioning system?

(7) Configuration: Even with all the right parts slated to be assembled in the right order, will they be arranged in the right way to form a functioning system?“

⁴⁵ YOUNG M (2004, 22) wendet das Kooptions-Konzept auf die Entstehung der Gehörknöchelchen der Säuger an. Er argumentiert dabei aber vergleichend-biologisch, während es beim IC-Argument um Mechanismen geht. „The ear today may be irreducible complex, but once it was not“; er nennt dafür aber außer dem Formenvergleich keine Begründung (s. dazu Abschnitt „Vergleichende Biologie als Argument“).

⁴⁶ Ähnlich auch GENE (2000): „Thus, it would seem that the more complex an IC system is, and the less variable it is across phylogenetic lines, the less likely it is that adoption from a different function explains its origin.“

⁴⁷ „It is to be expected that the opportunism of evolutionary processes would mix and match proteins in order to produce

new and novel functions.“

⁴⁸ „This evidence shows us that flagella are not isolated swimming machines but one end of a continuum of secretion-motility systems“ (MUSGRAVE 2004, 83).

⁴⁹ „But note, it is not possible simply to substitute the TTSS for the corresponding part of the bacterial flagellum and have a functioning flagellum. Because the proteins in the TTSS are not adapted to the proteins of the bacterial flagellum, the resulting kludge would be nonfunctional. ... What's needed is a complete evolutionary path and not merely a possible oasis along the way“ (DEMBSKI 2004, 23).

⁵⁰ Im Text wird im Rahmen des Evolutionsparadigmas argumentiert. Wird dieses jedoch nicht zugrundegelegt, bleibt zunächst offen, ob der TTSS-Apparat überhaupt auf irgendeine Weise evolviert ist. Es kann auch als ein eigenständiges kompliziertes System betrachtet werden, das nicht durch Degeneration eines noch komplizierteren (Bakterienmotor) entstanden ist.

⁵¹ Solche Beispiele werden auch in JUNKER & SCHERER (2006, 143-145) beschrieben.

⁵² „If Behe were to look at the biochemical pathway for vision in insects, he would find it almost completely different from that in vertebrates; but on delving deeper, he would see something more remarkable than two unrelated complex examples. Though the wiring in the insect and the wiring in the vertebrate are completely different, the components used in the two visual systems are again taken from a shared dowry of conserved core processes present in both organisms. The signaling pathways found in the insect eye and in the vertebrate eye possess the same capacity of weak linkage inherited from the first eukaryotic single-celled organisms some two billion years ago. Behe sees the constraint in the particular design, but not the deconstrain these designs provide“ (KIRSCHNER & GERHART 2005, 269).

⁵³ Mit „mechanismisch“ ist in Anlehnung an MAHNER & BUNGE (2000, 79) gemeint, dass dem beschriebenen Vorgang ein materieller, gesetzmäßiger, prüfbarer Mechanismus zugrunde liegt.

⁵⁴ Auch DUNKELBERG (2003) bezeichnet einzelne Proteine fälschlicherweise als IC-Systeme.

⁵⁵ „This reaction satisfies Behe's criteria for irreducible chemical complexity since in this reaction sequence there are many key components and pathways, and the characteristic behavior of the system is disrupted if key components (for example bromide ions or cerous ions) are absent at a critical phase of the reaction (or somehow removed as they are produced). Irreducible complexity in a self-organizing system is something generated and sustained by natural mechanisms which can be elucidated without the aid of a *deus ex machina*. The patterns of behavior observed in this chemical system result solely from the operation of chemical laws and initial conditions.“

⁵⁶ Es ist daher unklug von BEHE, Komplexitätstheorie als „abstract“ und „fact free“ zu bezeichnen, hier wird er zu Recht kritisiert.

⁵⁷ Weitere Beispiele: GISHLICK (2004, 66) argumentiert vergleichend-biologisch am Beispiel der Entstehung der Federn; darüber hinaus verweist er auch paläontologische Befunde. Das ist im Zusammenhang mit IC und Mechanismenfragen irrelevant. „Yet, though the basic pattern of metabolism is common to all species, biochemical evolution has occurred, and in ways that reflect the evolution of organic diversity“ (SHANKS & JOPLIN 1999). Ebenso: THORNHILL & USSERY (2000, 114), DUNKELBERG (2003), MILLER (2000, 152ff.), WEBER (1999,

957).

⁵⁸ „The existence of simpler flagella means that it is in principle possible to evolve complex flagella from simpler flagella. A professional biologist always investigates related species when he wants to know the origin of a biological structure“ (KORTHOFF 2007).

⁵⁹ „... we have no guarantee that we can reconstruct the history of a biochemical pathway. But even if we can't, its irreducible complexity cannot count against its gradual evolution any more than the irreducible complexity of a program does – which is to say, not at all.“

⁶⁰ CONWAY MORRIS (2000, 1) bemerkt, dass die Schwämme einerseits als die primitivsten lebende Metazoen gelten, dass ihre Biochemie dennoch Elemente enthalte, die das Immunsystem der Wirbeltiere vorwegnehmen. Mit solchen Fähigkeiten scheinen die Schwämme fast „Tiere in Wartestellung“ („animals in waiting“) zu sein; allerdings sei dies eine verkehrte Sicht. Dennoch: Viele grundlegende Bausteine und Abläufe seien unter den Eukaryoten sehr verbreitet und müssten daher sehr viel früher in den ersten Tieren entstanden sein. „Primitive organisms, such as sponges, or even protists for that matter, appear to be genomically elaborate, whereas some derived and simplified types can show a corresponding genomic impoverishment“ (CONWAY MORRIS 2000, 5). „A gene known to be of major importance in organogenesis in a higher animal also occurs in a more primitive group“ (CONWAY MORRIS 2000, 1; der Autor bringt einige Beispiele). Und gegen Ende seines Artikel schreibt er: „Most, perhaps all, of the basic building blocks necessary for organismal complexity were available long before the emergence of multicellularity. How and when the gene networks and regulatory mechanisms that led to the complex organs and functioning organisms were assembled is largely obscure“ (CONWAY MORRIS 2000, 8). Das bedeutet insgesamt, dass es verbreitet Stasis im biochemischen Bereich gibt. Stasis aber kann als Hinweis auf IC gewertet werden.

⁶¹ „Fifty years ago, the cell seemed much simpler, and in our innocence it was easier then to think that Darwinian processes might have accounted for it. But as biology progressed and the imagined simplicity vanished, the idea of design became more and more compelling.“

⁶² „In recent years, it has been shown that the bacterial flagellum is an even more sophisticated system that had been thought.“

⁶³ Es tut hier nichts zur Sache, dass für die meisten Biologen Evolution als historischer Prozess durch Fossilien oder vergleichend-biologische Daten als gut begründet gilt. Denn in der Frage nach ID und für das IC-Argument spielt das keine Rolle, weil es dort um das „Wie“, nicht um das „Ob“ geht. Die Frage, ob es eine allgemeine Evolution gab, wird bekanntlich von ID-Befürwortern unterschiedlich beantwortet. Gemeinsam ist ihnen nur die Auffassung, dass natürliche Mechanismen für die Erklärung der Entstehungsweise der Konstruktionen des Lebens unzureichend sind.

Quellen

- ADAMI C (2006) Reducible Complexity. *Science* 312, 61-63.
BEHE MJ (1996/2006) Darwin's Black Box: the Biochemical Challenge to Evolution. New York. (In der Auflage von 2006 publizierte Behe ein Nachwort „Ten Years Later“, in welchem er auf wichtige Gegenargumente eingeht.)
BEHE M (1997) The sterility of Darwinism. The Boston Re-

- view, Feb/March 1997. http://www.arn.org/docs/behe/mb_brresp.htm. Zugriff am 29. 4. 08.
- BEHE MJ (2000a) Self-organization and irreducibly complex structures: a reply to Shanks and Joplin. *Phil. Sci.* 67, 155-162.
- BEHE (2000b) In Defense of the Irreducibility of the Blood Clotting Cascade: Response to Russell Doolittle, Ken Miller and Keith Robison. www.discovery.org/scripts/viewDB/index.php?command=view&id=442. Zugriff am 29. 4. 08.
- BEHE M (2000c) A mousetrap defended: response to critics. www.arn.org/docs/behe/mb_mousetrapdefended.htm. Zugriff am 29. 4. 08.
- BEHE M (2000d) A True Acid Test: Response to Ken Miller. http://www.arn.org/docs/behe/mb_trueacidtest.htm. Zugriff am 28. 3. 08
- BEHE MJ (2001) Reply to my critics: A response to reviews of *Darwin's Black Box: the Biochemical Challenge to Evolution*. *Biol. Philos.* 16, 685-709.
- BEHE M (2002) Irreducible Complexity and the Evolutionary Literature. A Response to Critics. www.trueorigin.org/behe04.asp. Zugriff am 29. 4. 08.
- BEHE MJ (2004) Irreducible Complexity. Obstacle to Darwinian Evolution. In: DEMBSKI WA & RUSE M (eds) *Debating Design. From Darwin to DNA*. Cambridge, pp. 352-370.
- BEHE M (2006) The Lamest Attempt Yet to Answer the Challenge Irreducible Complexity Poses for Darwinian Evolution. www.idthefuture.com/2006/04/the_lamest_attempt_yet_to_answ.html. Zugriff am 29. 4. 08.
- BEHE M (2007) *The Edge of Evolution*. New York.
- BEYER A (2005) Evolution kontra Kreationismus. www.memories-web.de/beyera/texte/Kreationismus-Beyer.ppt. Zugriff am 22. 6. 05.
- BUGGE TH, KOMBRINCK KW, FLICK MJ, DAUGHERTY CC, DANTON MJ & DEGEN JL (1996) Loss of fibrinogen rescues mice from the pleiotropic effects of plasminogen deficiency. *Cell* 87, 709-719.
- BRIDGHAM JT, CARROLL SM & THORNTON JW (2006) Evolution of Hormone-Receptor Complexity by Molecular Exploitation. *Science* 312, 97-100.
- CONWAY MORRIS S (2000) Evolution: Bringing Molecules into the Fold. *Cell* 100, 1-11.
- COPLEY SD (2000) Evolution of a metabolic pathway for degradation of a toxic xenobiotic: the patchwork approach. *Trends Biochem. Sci.* 25, 261-265.
- DARWIN C (1968 [1859]) *The origin of Species*. Penguin Books, Harmondsworth.
- DEMBSKI WA (2002) No Free Lunch: Why Specified Complexity Cannot Be Purchased without Intelligence. Rowman & Littlefield, Lanham, MD.
- DEMBSKI WA (2004) Irreducible complexity revisited. www.designinference.com/documents/2004.01.Irred_Compl_Revisited.pdf. Zugriff: 26. 3. 08)
- DEMBSKI WA (2005) Allen Orr in the New Yorker – A Response. <http://www.uncommondescent.com/evolution/allen-orr-in-the-new-yorker-a-brief-response/>. Zugriff am 29. 4. 08.
- DOOLITTLE RF (1997) A delicate balance. *Boston Review* [Feb/March], 28-29.
- DRAPER P (2002) Irreducible complexity and Darwinian gradualism: a reply to Michael J. Behe. *Faith and Philosophy* 19, 3-21.
- DUNKELBERG P (2003) Irreducible complexity demystified. <http://www.talkdesign.org/faqs/icdmyst/ICDmyst.html>. Zugriff am 29. 4. 08.
- FORREST BC & GROSS PR (2007) Biochemistry by design. *Trends Biochem. Sci.* 32, 301-310.
- FRANCIS JW (2000) Peering into Darwin's Black Box: The cell division processes required for bacterial life. *Origins & Design* 20, 18-32.
- GENE M (2000) Irreducible Complexity And Darwinian Pathways Guest response to article by R.H. Thornhill and D.W. Ussery. http://www.arn.org/docs/behe/mb_mg1darwinianpathways.htm. Zugriff am 16. 4. 08.
- GENE M (2007) *The Design Matrix*. Arbor Vitae Press.
- GISHLICK AD (2004) Evolutionary Paths to Irreducible Systems. The Avian Flight Apparatus. In: YOUNG M & EDIS T (eds) *Why Intelligent Design Fails. A Scientific Critique of the New Creationisms*. New Brunswick u.a. pp. 58-71.
- GOULD SJ & ELDREDGE N (1993) Punctuated equilibrium comes of age. *Nature* 366, 223-227.
- GRIFFITH S (2004) Irreducible Complexity. http://www.iscid.org/papers/Griffith_IrreducibleComplexity_052504.pdf. Zugriff am 15. 4. 08.
- GUTMANN M & WARNECKE W (2006) Wissenschaftstheoretische Kritik am Kreationismus. Querschnitte. Materialien zur Unterrichtsvorbereitung und Selbststudium. Frankfurt (M). Jg. 1(4), S. 25-27.
- HANSEN TF (2003) Is modularity necessary for evolvability? Remarks on the relationship between pleiotropy and evolvability. *Biosystems* 69, 83-94. <http://bio.fsu.edu/~tfhansen/publist/Hansen2003.pdf>
- JOURNET L, HUGHES KT & CORNELIS GR (2005) Type III secretion: a secretory pathway serving both motility and virulence. *Mol. Membrane Biol.* 22, 41-50.
- JUNKER R (2002) Ähnlichkeiten, Rudimente, Atavismen. Design-Fehler oder Design-Signale? *Studium Integrale*. Holzgerlingen.
- JUNKER R (2005) Methodik der historischen Forschung. www.genesisnet.info/schoepfung_evolution/e40462.php. Zugriff am 15. 4. 08.
- JUNKER R (2006) Zur Abgrenzung von Mikroevolution und Makroevolution. *Stud. Int. J.* 13, 59-67.
- JUNKER R (2007) Evo-Devo. http://www.genesisnet.info/schoepfung_evolution/e41266.php
- JUNKER R (2008) Spuren Gottes in der Schöpfung? Eine kritische Analyse von „Intelligent Design“. In Vorbereitung.
- JUNKER R & SCHERER S (2006) *Evolution – ein kritisches Lehrbuch*. Gießen.
- KIRSCHNER MW & GERHART JC (2005) *The Plausibility of Life. Resolving Darwins Dilemma*. New Haven and London.
- KORTHOFF G (2007) Does irreducible complexity refute neo-Darwinism? <http://home.wxs.nl/~gkorthof/korthof8.htm>. Zugriff am 15. 4. 08
- LEISOLA M (2004) Über die Entstehung neuer Proteine. *Stud. Int. J.* 11, 67-75.
- LÖNNIG WE (2004) Dynamic genomes, morphological stasis and the origin of irreducible complexity. In: PARISI V, DE FONZO V & ALUFFI-PENTINI F (eds) *Dynamical Genetics*. Kerala, India, pp. 101-119.
- MAHNER M & BUNGE M (2000) *Philosophische Grundlagen der Biologie*. Berlin.
- MARKL P (2007) Evolutionstheorie im Kontext. In: KÖRTNER UHJ & POPP M (Hg) *Schöpfung und Evolution – zwischen Sein und Design*. Wien, S. 13-61.
- MCDONALD JH (2002) A reducibly complex mousetrap. <http://udel.edu/~mcdonald/mousetrap.html>. Zugriff am 15. 4. 08
- MCDONALD JH (2003) A reducibly complex mousetrap. <http://udel.edu/~mcdonald/oldmousetrap.html>. Zugriff am 15. 4. 08
- MEYER SC (2002) Design: The Methodological Equivalence of Naturalistic and Non-Naturalistic Origins Theories. www.discovery.org/scripts/viewDB/index.php?

- [command=view&id=1780](#). Zugriff am 15. 4. 08.
- MILLER KR (2000) Findig Darwin's God.
- MILLER KR (2004) The Flagellum Unspun. The Collapse of „Irreducible Complexity“. In: DEMBSKI WA & RUSE M (eds) Debating Design. From Darwin to DNA. Cambridge, pp. 81-97.
- MINNICH SA & MEYER SC (2004) Genetic analysis of coordinate flagellar and type III regulatory circuits in pathogenic bacteria. In: COLLINS MW & BREBBIA CA (eds) Proceedings of the Second International Conference on Design & Nature, Rhodes Greece. WIT Press. www.discovery.org/scripts/viewDB/filesDB-download.php?id=389. Zugriff am 15. 4. 08.
- MUSGRAVE I (2004) Evolution of the Bacterial Flagellum. In: YOUNG M & EDIS T (eds) Why Intelligent Design Fails. New Brunswick. S. 72-84.
- NELSON P (2006) How to Explain Irreducible Complexity – A Lab Manual (Step One; to be continued). <http://www.discovery.org/a/3419>. Zugriff am 15. 4. 08.
- NEUHAUS K (2002) Gene tinkering: Kann in komplexe biologische Systeme neue Information eingeflickt werden? Stud. Int. J. 9, 59-66.
- ORR AH (1996/1997) Darwin v. Intelligent Design (Again). The Boston Review, Dec 1996/Jan 1997. <http://bostonreview.net/BR21.6/orr.html>. Zugriff am 29. 4. 08
- ORR AH (2005) DEVOLUTION. Why intelligent design isn't. The New Yorker. Issue of 2005-05-30. http://www.newyorker.com/fact/content/articles/050530fa_fact. Zugriff am 29. 4. 08.
- PALLEN MJ & MATZKE NJ (2006) From *The Origin of Species* to the origin of bacterial flagella. Nat. Rev. Microbiol. 4, 784-790.
- PITMAN SD (2005) Evolving the flagellum and the climbing of „Mt. Improbable“. <http://naturalselection.0catch.com/Files/Flagellum.html>. Zugriff am 29. 4. 08.
- RAMMERSTORFER M (2004) „What Nature Doesn't“ – zwei Perspektiven. <http://members.aon.at/evolution/WNDODesign.pdf>. Zugriff am 26. 3. 08.
- RHONHEIMER M (2007) Neodarwinistische Evolutionstheorie, Intelligent Design und die Frage nach dem Schöpfer *Imago Hominis* 14, 47-81.
- ROBINSON AJ, KROPATKIN M & AGGELER PM (1969) Hageman Factor (Factor XII) deficiency in marine mammals. Science 166, 1420-1422.
- ROBISON K (1996) Darwin's Black Box: Irreducible Complexity or Irreproducible Irreducibility? www.talkorigins.org/faqs/behe/review.html. Zugriff am 29. 4. 08.
- RUSE M (2005) The Evolution Controversies: An Overview. In: WUKETTIS FM & AYALA FJ (eds) Handbook of Evolution. Weinheim.
- SADEDIN S (2006) A simple model for the evolution of irreducible complexity. <http://www.csse.monash.edu.au/~suzannes/files/Sadedin2006TR.pdf>. Zugriff am 29. 4. 08.
- SCHERER S (1983) Basic functional states in the evolution of cyclic photosynthetic electron transport. Journal of Theoretical Biology 104, 289-299.
- SCHERER S (1995) Höherentwicklung bei Bakterien: Ist ein molekularer Mechanismus bekannt? In: MEY J, SCHMIDT R & ZIBULLA S (Hg) Streitfall Evolution. Stuttgart.
- SCHERER S (2008) Zur Evolution des bakteriellen Rotationsmotors: Stand der aktuellen Diskussion. www.evolutionlehrbuch.info (in Vorbereitung)
- SCHNEIDER TD (2000) Evolution of biological information. Nucleic Acids Research 28, 2794-2799.
- SHANKS N & JOPLIN K (1999) Redundant complexity: A critical analysis of Intelligent Design in Biochemistry. Phil. Sci 66, 268-282.
- SHANKS N & JOPLIN K (2001) Behe, Biochemistry, and the Invisible Hand. Philo 4(1). http://www.philoonline.org/library/shanks_4_1.htm. Zugriff am 29. 4. 08.
- SMART JA (2003) On the Application of Irreducible Complexity. http://www.iscid.org/papers/Smart_Application_OffC_060503.pdf. Zugriff am 29. 4. 08.
- TAUTZ D (1992) Redundancies, development and the flow of information. BioEssays 14, 263-266.
- THEOBALD D (2007) The Mullerian two-step: add a part, make it necessary. <http://www.talkorigins.org/faqs/comdesc/ICsilly.html>. Zugriff am 29. 4. 08.
- THORNHILL RH & USSERY DW (2000) A Classification of Possible Routes of Darwinian Evolution. J. theor. Biol. 203, 111-116.
- ULLRICH H, WINKLER N & JUNKER R (2006) Zankapfel Auge. Ein Paradebeispiel für „Intelligent Design“ in der Kritik. Stud. Int. J. 13, 3-14.
- USSERY D (2004) Darwin's Transparent Box. The Biochemical Evidence for Evolution. In: YOUNG M & EDIS T (eds) Why Intelligent Design Fails. A Scientific Critique of the New Creationisms. New Brunswick u.a. pp. 48-57.
- VOGEL S (2003) Comparative Biomechanics. Life's Physical World. Princeton University Press.
- WASCHKE T (2003) Intelligent Design. Eine Alternative zur naturalistischen Wissenschaft? Skeptiker 16, 128-136. www.gwup.org/skeptiker/archiv/2003/4/intelligentdesigngwup.html. Zugriff am 29. 4. 08.
- WASCHKE T (2007) Moderne Evolutionsgegner – Kreationismus und Intelligent Design. In: DRESLER M (Hg) Wissenschaft an den Grenzen des Verstandes. Stuttgart, 93-104.
- WEBER BH (1999) Irreducible complexity and the problem of biochemical emergence. Biol. Philos. 14, 593-605.
- YOUNG M (2004) Grand Design and Facile Analogies. Exposing Behe's Mousetrap and Dembski's Arrow. In: YOUNG M & EDIS T (eds) Why Intelligent Design Fails. A Scientific Critique of the New Creationisms. New Brunswick u.a. pp. 20-31.