

## Die Suche nach fundamentalen physiologischen Mechanismen: Kooperationen zwischen Biologie, Physik und Chemie (1918-1939)

Die Dissertationsschrift analysiert einen bestimmten Typus biologischer Forschung, der in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts an Bedeutung gewann: die Erklärung makroskopischer Lebensprozesse über unterliegende biophysikalische oder biochemische Vorgänge auf der Mikroebene. Die Zentren dieser Forschung formierten sich in Europa und Nordamerika in Institutionen ganz unterschiedlicher Denomination. Häufig findet sich der Überbegriff „physico-chemische Biologie“, die betrachtete Forschung lief aber auch unter Labeln wie „general physiology“, „biophysics“ oder „biochemistry“. Die Ambiguität ist kein Zufall: Die Kombination von Forschungszielen und Methoden verschiedener naturwissenschaftlicher Felder war wesentliches Kennzeichen dieser „mechanistischen“ Forschung.

Die Arbeit zielt darauf, diese Forschung in ihrer Praxis und disziplinären Verortung besser zu verstehen: Wie wählten die Akteure ihre Forschungsprobleme und wie gingen sie vor, um diese zu lösen? Immerhin befinden wir uns in der Zeit vor der Molekularisierung und zelluläre Prozesse waren allenfalls indirekt zugänglich. Wie veränderte die Suche nach Mechanismen die beteiligten Disziplinen und Protagonisten? Mit diesen Fragen wirft die Arbeit einen frischen Blick auf die Biologie der 1920/30er Jahre. Die Literatur betrachtete die Periode bisher mit Blick auf Einzelakteure (z.B. Jacques Loeb), Institutionen (z.B. die Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft) oder Förderprogramme (z.B. jene der Rockefeller Foundation). Alternativ wurde nach Vorläufern und Wurzeln der später so erfolgreichen Molekularbiologie bzw. -genetik gesucht. Die vorliegende Arbeit analysiert im Gegensatz dazu vier Episoden aus Sinnesphysiologie, Hormonforschung, chemischer Genetik und Elektrophysiologie, die der Wissenschaftsgeschichte kaum bekannt sind, zeitgenössisch jedoch breit rezipiert wurden.

Die Episoden werden analysiert anhand einer intensiv diskutierten Perspektive der Wissenschaftsphilosophie, des *new mechanism*, propagiert u.a. von William Bechtel, Carl Craver und Lindley Darden. Laut den VertreterInnen dieses Ansatzes werden biologische Phänomene erklärt mit Verweis auf Mechanismen (statt etwa Gesetzen). Weiter vertreten sie konkrete Thesen darüber, wie solche Mechanismen erforscht werden. Diese Thesen wurden in den letzten zwanzig Jahren umfassend rezipiert und weiterentwickelt. Allerdings stützen sie sich auf eine eher dünne empirische Basis und die Debatte verbleibt meist abstrakt und/oder normativ. Die Konzepte der *new mechanists* dienen in der Arbeit als analytisches Instrumentarium, um historische Episoden zu erhellen. Gleichzeitig werden die Anwendbarkeit und den Geltungsbereich der philosophischen Thesen ausgelotet.

Im Ergebnis zeigt sich, dass die Konzepte der *new mechanists* die Grundzüge der Forschungspraxis der physico-chemischen Biologie weitgehend adäquat beschreiben. Es wird aber auch deutlich, wo das begrenzte Beispielinventar die PhilosophInnen zu vorschneller Generalisierung verleitete. Vor allem aber zeigt sich, wie erhellend es ist, den Blick zu weiten und zusätzlich die Motivation der Akteure zu integrieren sowie lokale Bedingungen wie vorhandene Ressourcen und Expertisen. Die Kenntnis dieser Faktoren erlaubt etwa, die Formierung disziplinenübergreifender Forschungsk Kooperationen zu erklären.

Im ersten Kapitel werden der Gegenstand und der methodische Zugang der Arbeit eingeführt. Die Vision einer „physico-chemische Biologie“ war nach 1918 keineswegs komplett neu, aber sie erlebte einen enormen Aufschwung und galt vielen ForscherInnen wie Wissenschaftsmanagern als besonders zukunftsträchtig und geeignet zur Untersuchung

komplexer biologischer Phänomene. In der wissenschaftshistorischen Literatur werden die relevanten kulturellen und politischen Kontexte dieser Forschung zwar erhellt. Die eigentliche Forschungspraxis jedoch haben WissenschaftshistorikerInnen bisher kaum in den Blick genommen. WissenschaftsphilosophInnen wiederum konzentrierten sich auf die Charakterisierung der angestrebten Endprodukte der Forschungsaktivität, der Mechanismus-Modelle. Wie diese zustande kamen, diskutierte sie hingegen kaum. Die Lücke zwischen diesen beiden Analysetraditionen schließt die Arbeit mit der exemplarischen Untersuchung von Forschungsprojekten der 1920er und 1930er Jahre. Diese Praxis wird analysiert als Komplex von Forschungshandlungen, mit denen Akteure epistemische Ziele zu erreichen suchten. Die Wahl geeigneter Handlungen unterlag methodologischen Normen, etwa dem Mandat präziser, quantitativer Verfahren und sie wurden begrenzt durch die Verfügbarkeit bestimmter Ressourcen (z.B. Instrumente oder Konzepte) und Fähigkeiten (z.B. die Kompetenz, das Instrument bedienen oder rechnen zu können). Den *new mechanists* zufolge verlangt das Ziel, den einem biologischen Phänomen zugrundeliegenden Mechanismus zu finden, die Ressourcen und Fähigkeiten unterschiedlicher Disziplinen. Diese Feststellung bietet einen interessanten Erklärungsansatz für die Konjunktur disziplinenübergreifender Forschung in der physico-chemischen Biologie der Zwischenkriegszeit.

Das zweite Kapitel bereitet die Bühne für die Fallstudien. Zunächst wird auf der Basis von zeitgenössischen Quellen und Überlegungen aus der Literatur dargelegt, dass Disziplinen die Forschungspraxis prägen; und zwar über die inhaltlichen Ziele, die die ForscherInnen anstreben, die Kriterien, nach denen ihre Lösungsvorschläge beurteilt werden und den Fähigkeiten und Ressourcen, die ihnen beigebracht und zur Verfügung gestellt werden. Darauf folgt ein Überblick über wichtige Ziele, methodologische Normen sowie praktische Kompetenzen in Physik, Chemie und (biologischer) Physiologie um 1920. Auf der Grundlage von Lehrbüchern und Curricula wird herausgearbeitet, wie all dies in den Fächern vermittelt wurde und welche Ressourcen disziplinär agierende Institutionen bereitstellten. Die Forschungstrends werden abgeleitet aus Überblicksartikeln, programmatischen Reden und einschlägigen Handbüchern. Physik und Chemie zeigten sich im Durchschnitt wenig interessiert an biologischen Problemen, wobei wichtige Einzelfiguren wie Ernst Mach und Emil Fischer prominent herausstechen. Disziplinenübergreifenden Studien wurde sehr wohl großes Potential zugeschrieben. Die Mehrzahl der Physiker- und ChemikerInnen war aber skeptisch ob der Durchführbarkeit solcher Projekte. Die Physiologie hingegen, insbesondere in ihrer Ausrichtung als *general physiology*, suchte aktiv Anschluss an die physikalischen Wissenschaften. Das Interesse der PhysiologInnen an der physikalischen und organischen Chemie steht in direkter Verbindung mit deren Ziel, Lebensphänomene mit Verweis auf die ihnen zugrunde liegenden innerzellulären Prozessen zu erklären. Biologische Methoden ermöglichten die Beschreibung von Makrophänomenen. Um diese Makrophänomene aber auf Mikroprozesse zurückführen zu können, brauchte es chemische und physikalische Ansätze. Das propagierten Autoren wie Julius Sachs und Claude Bernard bereits im 19. Jahrhundert. Nun hoffte man, diese Visionen in konkrete Projekte übersetzen zu können.

Im dritten und letzten Teil des zweiten Kapitels werden die Thesen der *new mechanists* genauer eingeführt. Diese PhilosophInnen erklären das Zustandekommen interdisziplinärer Forschungsk Kooperationen damit, dass die Suche nach den Mechanismen biologischer Phänomene auf mehreren „Ebenen“ ansetzen muss: Ein biologisches Phänomen, so die These, wird erklärt durch die Beschreibung der ihm zugrunde liegenden physico-chemischen Vorgänge. Die Erforschung von Mechanismen verlaufe entsprechend wie folgt: BiologInnen begegnen einem überraschenden, erklärungs würdigen Phänomen. Sie entwerfen ein *how possibly*-Schema eines Mechanismus für dieses Phänomen und überführen dieses durch gezielte Studien in ein *how actually*-Mechanismus-Schema. Experimentell werden Annahmen zu den kausalen und konstitutiven Beziehungen der Bestandteile des Mechanismus geprüft. Gegebenenfalls wird das Schema angepasst und erneut neu überprüft.

Diese Vorstellung der disziplinenübergreifenden mechanistischen Forschung birgt trotz ihrer Abstraktheit ein großes Potential für das Verständnis der biophysikalischen und biochemischen Forschungspraxis der Zwischenkriegszeit. Vor allem ist sie unmittelbar anschlussfähig an aktuelle Erklärungsmodelle disziplinenübergreifender Forschung. So integrieren unterschiedliche Disziplinen ihre Ergebnisse laut Hanne Andersen und Nancy Nersessian über sogenannte *interlocking models*. Während Andersen dabei hauptsächlich an geteilte mentale Modelle des gemeinsam untersuchten Gegenstands denkt, betont Nersessian, dass erfolgreiche interdisziplinäre Forschung außerdem auf materielle *interlocking models* angewiesen ist, die sich mit den Methoden der verschiedenen Disziplinen manipulieren lassen. Die oben besprochenen Mechanismus-Schemata erfüllen die Funktion konzeptueller *interlocking models*; sie enthalten Annahmen zu konstitutiven *interlevel*- und kausalen *intralevel*-Beziehungen. Da diese Annahmen mitunter die Beziehung von Komponenten klären, die in unterschiedlichen Disziplinen untersucht werden (z.B. ein Hormon in der Organischen Chemie und seine Wirkung in der Physiologie), sind diese Annahmen gleichzeitig oft *interfield*-Annahmen. Als solche lassen sie sich nur unter der Mobilisierung der Ressourcen und Fähigkeiten der betroffenen Felder überprüfen. Soweit die abstrakte Erwartung aus der wissenschaftsphilosophischen Literatur. Wie verhält sich dazu nun die historische Forschungspraxis? Dies wird in den Kapiteln 3–6 an vier Episoden der physico-chemischen Biologie der 1920er und 1930er Jahre untersucht. Das Material ist nach dem folgenden Muster geordnet: Zunächst werden die Forschungshandlungen der Akteure erläutert und zweitens ihre Ziele, Normen, Ressourcen und Fähigkeiten herausgearbeitet. Drittens werden die *interlocking*-Annahmen der Akteure identifiziert sowie die *interlocking*-Objekte, an denen sie diese Annahmen testeten. Abschließend wird die zeitgenössische Bewertung der jeweiligen Forschungsprojekte skizziert.

Den Beginn macht im dritten Kapitel die Erforschung des Sehprozesses durch Selig Hecht (1892–1947). Hecht war umfassend in Mathematik, Physik und Chemie ausgebildet, bevor er begann, sich für biologische Phänomene zu interessieren. Als *interfield*-Experte brachte er alle Voraussetzungen mit, um disziplinenübergreifend zu arbeiten. Hecht wurde weithin berühmt für seine Studien zur Photochemie des Sehens und galt als leuchtendes Beispiel für gute Forschung. Das Kapitel verfolgt im Detail, wie Hecht seine Untersuchungen an den Lichtreaktionen von *Ciona intestinalis* begann, an *Mya arenaria* fortsetzte und schließlich zu Fröschen und Menschen übergang. Er prüfte etwa den Einfluss der Belichtungszeit und -intensität oder der Temperatur auf die Dauer der postulierten chemischen Reaktionen. Das an marinen Invertebraten entwickelte Mechanismus-Modell blieb im Weiteren stabil. Dass sich das Modell zur Beschreibung der Lichtwahrnehmung so unterschiedlicher Organismen wie Seescheiden, Muscheln und Wirbeltieren eignete, sorgte Aufsehen.

Dass Hechts Forschung so beeindruckte, erstaunt auf den ersten Blick. In der Sache war sein Vorschlag nicht neu. Schon seit den 1870er Jahren vermutete man, Lichtwahrnehmung und Farbsehen könnten auf photochemischen Vorgängen beruhen. Doch gelang es nicht, das lichtempfindliche Pigment aus der Retina eines Wirbeltiers zu isolieren. Und so blieb die weitere Erforschung der photochemischen Mechanismen stecken. Das große Verdienst von Hecht war es, diese Schwierigkeit durch die Wahl eines alternativen *interlocking*-Modells zu umgehen: Er untersuchte die Lichtrezeption in den weit einfacheren Systemen von *Ciona* und *Mya*. Er beschrieb für diese Systeme die Phänomene in hohem Detail und formulierte ein *how possibly*-Schema, nach dem deren Lichtwahrnehmung auf dem Wechselspiel einer photochemischen und einer thermochemischen Reaktion beruhte. Mit präzisen Daten und seiner Kompetenz in mathematischer Analyse, Reaktionskinetik und Thermodynamik war Hecht in der Lage, dieses Schema empirisch und theoretisch zu plausibilisieren. Hecht stützte sein Mechanismus-Schema also über die Eigenschaften der postulierten Aktivitäten (Dauer der chemischen Reaktionen) statt über Entitäten und deren Eigenschaften.

Das vierte Kapitel beleuchtet die Erforschung des Mechanismus des Pflanzenwachstums. Anders als im ersten Beispiel erfolgte diese in interdisziplinärer Kooperation von Organischen Chemikern und Pflanzenphysiologen in Utrecht und am Caltech in Pasadena. Hier gab es nicht eine zentrale Figur, sondern eine ganze Gruppe maßgeblicher Akteure, darunter Fritz Kögl (1897–1959), Arie Haagen-Smit (1900–1977), Frits Went (1903–1990), Kenneth Thimann (1904–1994) und James Bonner (1910–1996). Anders als Hecht wählten sie den direkten Weg: Sie bemühten sich, den Wuchsstoff zu isolieren, seine chemische Natur aufzudecken und seine Wirkung im biologischen System zu klären. Auch in diesem Fall lag besondere Leistung dieser Gruppen in der Etablierung eines geeigneten *interlocking*-Objekts: Koleoptilen von Haferpflänzchen. Anhand dieses Systems ließen sich die relevanten Phänomene präzise messen und beschreiben. Anhand einer enorm dichten Quellenbasis lässt sich nachvollziehen, wie das Forschungsproblem konzipiert wurden, welche Erwartungen die verschiedenen Fachgruppen mit der Lösung des Problems verbanden und wie die Arbeitsgruppen an beiden Standorten aufgebaut wurden. Dieses beidseitige Interesse der ChemikerInnen und BiologInnen an der Aufklärung des Mechanismus des Pflanzenwachstums ermöglichte und stützte die langjährige, höchst erfolgreiche interdisziplinäre Kooperation an beiden Standorten. Beiden Fachgruppen war bewusst, dass sie ihre Forschungsziele ohne die Ressourcen und Fähigkeiten der jeweils anderen Fachgruppe nicht würden erreichen können.

Die epistemischen Ziele der Protagonisten waren nicht identisch, aber positiv interdependent: Die BotanikerInnen brauchten den isolierten Wuchsstoff, um experimentell seine Wirkung studieren zu können und dadurch das Pflanzenwachstum besser zu verstehen. Zur Isolierung des Stoffes waren chemische Methoden und Kenntnisse erforderlich, über die sie nicht verfügten. Den OrganikerInnen hingegen ging es darum, ein Hormon zu isolieren und in seinen Eigenschaften zu charakterisieren, um den Zusammenhang von Struktur und Aktivität besser zu verstehen. Sie waren dafür auf biologische Expertise angewiesen: Um überhaupt von der Existenz solcher Stoffe zu erfahren und um die Wirksamkeit der Stoffe (und damit indirekt deren Vorliegen in einer gegebenen Probe) in einem physiologischen Test prüfen zu können. Im Verlauf der Kooperation stützten sich die ForscherInnen auf zunehmend verfeinerte *interlocking*-Annahmen über das Verhältnis des Wuchsstoffs und seiner Eigenschaften zur Volumenvergrößerung der Zellen im Basalbereich der Haferkoleoptilen.

Das fünfte Kapitel widmet sich der chemischen Genetik und ihren Anfängen in der Aufklärung der Synthese von Blütenfarbstoffen. Im Zentrum der Episode steht die englische Biochemikerin Rose Scott-Moncrieff (1903–1991), die zwischen der Gruppe des Organischen Chemikers Robert Robinson und den GenetikerInnen der John Innes Horticultural Institution vermittelte. Auch in diesem Fall konnten durch die Zusammenführung chemischer und biologischer Fähigkeiten und Ressourcen wesentliche disziplinäre Probleme gelöst werden: Genetische Daten gaben Aufschluss über die Biosynthese organischer Produkte, während eine bessere chemische Kenntnis dieser Produkte dazu beitrug, die Wirkung einzelner Gene zu bestimmen. Von dem Potential der Zusammenführung genetischer und chemischer Anthocyan-Studien war die Genetikerin und Biochemikerin Muriel Wheldale Onslow bereits in den 1900er Jahren überzeugt. Sie war es auch, die Scott-Moncrieff Ende der 1920er Jahre ermutigte, das Projekt erneut anzupacken. Wheldale Onslows Kollege J.B.S. Haldane stellte den Kontakt zu Robinson und der JIHI her und Scott-Moncrieff unterstützte die Forschung der beiden unabhängig arbeitenden Gruppen und konnte ihre Ergebnisse kombinieren. Scott-Moncrieffs Schlüssel-Expertise war die Isolierung natürlicher Pigmente aus frischen Blütenblättern. So konnten sie OrganikerInnen überprüfen, ob ihre synthetisierten Pigmente mit den natürlichen identisch waren. Und die GenetikerInnen erfuhren, welche Faktoren (Anthocyan-Typ, Co-Pigment, Zellsaft-pH) einer gegebenen Blütenfarbe zugrunde lagen.

Leitend war dabei die *interlocking*-Annahme, dass Gene (mindestens indirekt) die Bildung chemischer Substanzen beeinflussten, die sichtbaren Merkmalen, wie etwa der Blütenfarbe, zugrunde lagen. Gesucht war der Mechanismus, der diesen Einfluss vermittelte. Entscheidend

war auch hier die erfolgreiche Operationalisierung in geeigneten *interlocking*-Objekten: Scott-Moncrieff konnte auf genetisch gut erforschte Linien von Löwenmäulchen, Primeln und Dahlien zurückgreifen, deren Blüten die einschlägige Farbpalette aufwiesen. Ebenso entscheidend war die Entwicklung eines Schnelltests durch Robert und Gertrude Maud Robinson, über den sich verschiedene Anthocyan-Varianten identifizieren ließen. Die Organiker um Robinson lieferten dank ihrer künstlichen Synthesen Einsichten in die Struktur der einzelnen Anthocyane. Die GenetikerInnen wiederum klärten das Vererbungsmuster der Anthocyane führten es Ensembles genetischer Faktoren zurück. Die Eigenschaften der in den Nachfolgegenerationen ausgeprägten Anthocyane gaben Hinweise auf deren Bildungsweg dieser Pigmente und damit auf die Wirkung genetischer Faktoren. In der Genetik wie auch der Chemie wurde diese erste Aufklärung der Wirkung mendelscher Faktoren auf die Biosynthese organischer Stoffe als bahnbrechender Erfolg gefeiert und die „chemische Genetik“ galt spätestens Mitte der 1930er Jahre als Forschungsfeld der Zukunft

Das sechste Kapitel präsentiert eine Episode aus der Geschichte der Elektrophysiologie, in der sich Biologen und Physiker in Prag zusammenfanden. Ihr Ziel war es, durch Vitalfärbungen die elektrische Ladung biologischen Gewebes zu bestimmen. Anders als in den zuvor verhandelten Episoden ging es also nicht darum, den Mechanismus eines physiologischen Phänomens aufzuklären. Stattdessen sollte eine Methode entwickelt werden, anhand derer bestimmte physikalische Eigenschaften biologischer Entitäten detektiert werden können. Das Projekt wurde zwar international mit Interesse rezipiert, erwies sich letztlich aber als Fehlschlag. Treibende Kraft war der Verleger und Laien-Wissenschaftler Rudolf Keller (1875–1964). Keller plädierte er bereits 1918 für die Schaffung einer „Zellelektrohistologie“, die ihm als Schlüssel zur Erklärung biologischer Phänomene erschien. Allerdings fehlte es ihm an Sach- und Methodenkenntnis, um seine steilen Thesen zu unterfüttern. Mit privatem Vermögen begründete er daher 1923 die „biologisch-physikalische Arbeitsgruppe“ an der Deutschen Karlsuniversität in Prag, geleitet von dem Biologen Josef Gicklhorn und „beaufsichtigt“ durch den Physiker Reinhold Fürth. Fürth hatte sich bereits vorher mit der Anwendung physikalischer Konzepte auf biologische Phänomene beschäftigt und etwa die Bewegung von Pantoffeltierchen nach Prinzipien der Brownschen Bewegungen modelliert. Gicklhorn empfahl sich demgegenüber durch solide Expertise in Mikroskopie und Histologie.

Die Idee einer Elektrohistologie schien keineswegs abwegig. Kellers Thesen entsprachen gerade so weit den Normen und Zielen der physico-chemischen Biologie, dass man dem Projekt eine Chance gab. Kellers Vorhaben war durch vage *interlocking*-Annahmen motiviert. Diese Annahmen wurden jedoch nie in konkretere handlungsleitende Thesen überführt: Die Gruppe etablierte weder ein mentales noch ein materielles *interlocking*-Modell. Bis zuletzt blieb unklar, wie Färbeergebnisse und Potentialmessungen physiologisch zu deuten waren. Für Fürth war dies nicht weiter problematisch. Er behandelte anhand der generierten Daten physikalische Probleme. Der besondere Charme des Beispiels liegt in seiner Funktion als Kontrapunkt und Vergleichsstudie. Die Gründe für das Scheitern der Arbeitsgemeinschaft erhellen erneut die Planungsstruktur und experimentelle Praxis der erfolgreicherer Projekte.

Im siebten Kapitel erfolgt die übergreifende Auswertung der Beispiele. Die ersten drei Episoden lassen sich gewinnbringend mit dem analytischen Inventar des *new mechanism* beschreiben. Die philosophischen Begrifflichkeiten helfen zu verstehen, wie Forschungsprobleme konzipiert und disziplinäre Normen, Ressourcen und Fähigkeiten integriert wurden. Einige spezifische Befunde regen dazu an, die bisherige Literatur zu korrigieren oder doch zu ergänzen. Erstens ist die in der historischen Literatur gängige These einer klaren Hierarchie der Disziplinen – eine „Kolonisierung“ der Biologie durch Physik und Chemie – so nicht haltbar. Vielmehr ergaben sich oft Kooperationen auf Augenhöhe, bei der beide Parteien um ihre wechselseitige Abhängigkeit wussten. In den untersuchten Beispielen waren ChemikerInnen, PhysikerInnen und BiologInnen gleichermaßen an der Erforschung biophysikalischer und biochemischer Vorgänge interessiert, wenn auch mit disziplinär

differenten epistemischen Zielen. Keiner der Akteure arbeitete aus rein forschungspolitischen Gründen interdisziplinär. Sie ließen sich auf Kooperationen ein, weil methodologische Normen Ressourcen und Fähigkeiten verlangten, über die sie nicht verfügten. Aus diesen Befunden folgt, dass man nicht in erster Linie ein mechanistisches Projekt verfolgte, weil man ein interessantes Phänomen erklären wollte, wie es die *new mechanists* häufig voraussetzen. Vielmehr waren die Fähigkeiten und Ressourcen der Akteure entscheidend dafür, welche Phänomene und Mechanismen sie erforschten. Sie bevorzugten Projekte, in denen sie ihr Wissen und Können effizient einsetzen konnten, d.h. einen möglichst hohen Ertrag in möglichst kurzer Zeit erzielten. Andere Annahmen der *new mechanists* fanden empirische Stütze. So waren etwa häufig explizite oder implizite *interfield*-Annahmen handlungsleitend. Strategien wie das *forward/backward chaining* oder *functional decomposition* wurden eingesetzt, man operierte mit *how possibly*-Schemata und testete kausale Strukturen. Beispiele für *top-down* oder *bottom-up*-Experimente sucht man hingegen vergeblich. Auch erwies sich Cravers Forderung nach mehreren unabhängigen Wegen zur Bestätigung der mechanistischen Struktur als zu stark: die Akteure der Fallstudien waren froh, wenn es ihnen gelang, zumindest einen gangbaren Weg zu etablieren.

Verhältnismäßig wenig Rechnung trägt die philosophische Literatur der Bedeutung präziser Mess- und Detektionsverfahren. Die genaue Beschreibung des physiologischen Phänomens erwies sich in allen Beispielen als Voraussetzung für das Studium des ihm zugrundeliegenden Mechanismus. Weiter galt es, geeignete Versuchssysteme zu finden. Deren Eignung entschied sich daran, dass sie die fraglichen Phänomene regelmäßig, reproduzierbar und auf quantitativ messbare Weise zeigten sowie experimenteller Intervention zugänglich waren. Die Prager Forscher scheiterten, weil sie es versäumte, stabile Interventionsbedingungen herzustellen. Statt ein System zur Prüfung der Beziehungen zwischen elektrischer Ladung und physiologischem Verhalten zu identifizieren, drängte Keller auf eine Beschreibung der elektrischen Struktur biologischer Materie im Allgemeinen. Wenig überraschend scheiterte er mit diesem Vorhaben. Dies zeigt, wie wenig selbstverständlich und anspruchsvoll es war, physikalische, gar metaphysische Thesen zur Prüfung in biologisch praktikable Experimente zu übersetzen. Zwischen der ersten Formulierung von *interlocking*-Annahmen und ihrer empirischen Plausibilisierung vergingen jeweils Jahrzehnte.

Die soziale Struktur interdisziplinärer Projekte lässt sich weithin auf die Verschränkung von Zielen und Normen sowie die Verteilung von Ressourcen und Fähigkeiten zurückführen. Diese Formationen waren besonders stabil, wenn die Ziele beider Parteien positiv interdependent waren. Solange die Akteure glaubten, die Forschungsaktivitäten der jeweils anderen Partei würde sie ihrem eigenen Ziel näherbringen, unterstützten sie diese. Doch verloren Akteure das Interesse an der Kooperation, sobald sie ihr eigenes Ziel erreicht hatten oder zu der Einsicht kamen, dass der kooperative Aufwand letztlich in schlechtem Verhältnis zum potentiellen eigenen Ertrag stand. Aber auch bei einseitiger Zielabhängigkeit konnten stabile Kooperationen zustande kommen, wie das Beispiel von Fürth zeigt.

Das achte Kapitel verfolgt die intellektuellen und institutionellen Folgen der untersuchten Forschungsprojekte nach 1945. Die interdisziplinäre Erforschung der Mechanismen von Lebensprozessen hatte sich als attraktiver Wissenschaftszweig in Europa wie auch Nordamerika etabliert. Institute wurden begründet, Lehrstühle und Departments geschaffen, Zeitschriften eingerichtet, Studiengänge überarbeitet. Die noch 1919 konstatierte Skepsis der physikalischen Disziplinen war deutlich zurückgegangen; viele Protagonisten der Fallstudien arbeiteten erfolgreich an der Schnittstelle von Physik, Biologie und Chemie. Die Studie endet, wo die meisten biologiehistorischen Studien zum 20. Jahrhundert beginnen: an der Schwelle zur „Molekularbiologie“. Wir verstehen aber nun besser den Aufstieg dieser so erfolgreichen Forschungsrichtung, in der Protagonisten aus Physik, Chemie und Biologie darum rangen, intrazelluläre Mechanismen zu verstehen.