

---

Vororganische Ängste bewältigen

---

Definition der organischen Chemie

---

Die Geheimnisse des Kohlenstoffs knacken

---

Was Organiker so treiben

---

## Kapitel 1

# Die wundervolle Welt der organischen Chemie

**D**ie organische Chemie ist eine Tyrannin, über die Sie sicherlich schon viel gehört haben. Sie ist Ihnen schon häufig im Traum begegnet. Sie ist bestialisch und unglaublich schwierig. Sie ist unangenehm und stinkt fürchterlich nach billigem Parfüm. In diesem Kapitel führe ich Sie in die organische Chemie ein, und ich bin sicher, dass Sie alle Schauermärchen vergessen werden, die Sie über dieses Thema gehört haben.

In diesem Kapitel beweise ich Ihnen, dass die scheußlichen Gerüchte über die organische Chemie (größtenteils) erfunden sind. Ich erkläre Ihnen, was organische Chemie eigentlich ist und warum Sie kostbare Stunden Ihres Lebens dem Studium dieser interessanten Wissenschaft opfern sollten. Ich zeige Ihnen, dass die Erkundung der organischen Chemie eine wirklich lohnende und angenehme Entdeckungsreise ist, und dass diese Reise keineswegs nur bergauf geht.

## Sei willkommen, Du schöne organische Chemie

---

Obwohl die Organik ein sehr wichtiges und bedeutendes – und für viele auch ein sehr vernünftiges – Fach ist, weiß ich, dass die organische Chemie besonders einschüchternd ist, wenn Sie sich ihr zum ersten Mal nähern. Vielleicht haben Sie beim Kauf des Lehrbuchs schon erlebt, was viele Organik-Veteranen als »Die Erfahrung« bezeichnen. Als Sie das Buch in der Buchhandlung aus dem Regal genommen haben. Als Sie alle Muskeln anspannen mussten, um die Schwarte halten zu können. Als beim flüchtigen Durchblättern des Buchs die Angst in Ihnen aufstieg, die Angst, dass Sie all die unzähligen Seiten würden

lesen müssen. Und die Erkenntnis, dass diese Lektüre wohl weniger kurzweilig als »Räuber Hotzenplotz« und »Pippi Langstrumpf« werden würde.

Sicher sieht das erst einmal sonderbar aus, wenn Sie eine beliebige Seite des Buchs öffnen, auf der sich bizarre chemische Strukturen und gebogene Pfeile tummeln und zahllose Tabellen Sie mit undefinierbaren Zahlenwerten fast erschlagen, und bei Ihnen das dumpfe Gefühl aufkommt, das alles auswendig lernen zu müssen. Ich gebe zu, die organische Chemie ist ein wenig furchteinflößend.

## Die Seifenoper organischer Moleküle

Organische Moleküle regeln unsere Lebensprozesse wie den Stoffwechsel, die genetische Kodierung und die Energiespeicherung. In der Natur spielen organische Moleküle eine verrückte Seifenoper. Sie sind das Medium für viele Drehungen und Wendungen, für Betrug, Verrat, strategische Allianzen, für Romanzen und sogar für Krieg.

Nehmen Sie zum Beispiel die Pflanzen. Sie scheinen so wehrlos. Wenn ein Raubtier kommt und die Pflanzenblätter zum Mittagessen verspeisen möchte, kann die Pflanze nicht ihre Taschen packen und sich aus dem Staub machen. Sie ist an ihrem Platz festgenagelt und kann sich nicht wehren. Oder doch? Obwohl Pflanzen schutzlos erscheinen, sind sie es in Wirklichkeit nicht. Viele Pflanzen erzeugen scheußliche organische Verbindungen, die sehr unangenehm schmecken oder sogar giftig sind (schon als Kind war mir bewusst, dass Rosenkohl etwas ähnliches enthält). Feinde, die einmal von diesen köstlichen Verbindungen gekostet haben, werden in Zukunft von diesem Genuss Abstand nehmen (wenn sie überhaupt noch so etwas wie eine Zukunft haben).

Die Produktion von Giftstoffen, um nicht aufgefressen zu werden, ist schon gemein genug. Aber viele Pflanzen verwenden Verteidigungsstrategien, die noch viel bössartiger sind. Bestimmte Pflanzenarten bemerken, wenn sich eine Raupe dafür entschieden hat, ihre Blätter zu vertilgen (sie können die Raupe zwar nicht sehen, aber sie erkennen bestimmte organische Moleküle, die im Speichel der Raupe enthalten sind!). Wenn die Pflanze entdeckt, dass sich eine Raupe an ihren Blättern zu schaffen macht, stößt die Pflanze flüchtige organische Substanzen aus, die speziell dafür entworfen sind, Wespen anzuziehen. Wenn die Wespen nachsehen, was da los ist, entdecken sie die Raupen, die die Pflanze fressen wollen. Das Schicksal der Pflanze ist den Wespen natürlich völlig egal, aber die weiblichen Wespen brauchen einen guten Platz, um ihre Eier abzulegen. Und was könnte ein gemütlicheres Kinderzimmer sein als das Innere einer fetten, saftigen Raupe?

Wenn eine Wespe eine Raupe entdeckt, stürzt sie herab, landet auf dem Rücken der Raupe, sticht und betäubt sie und legt dann ihre Eier in der Raupe ab! Bald darauf schlüpfen die jungen Wespen-Larven aus ihren Eiern und vertilgen die Raupe von innen zum Frühstück. Zufrieden kauend bahnen sich die jungen Larven ihren Weg von innen nach außen, um sich außerhalb der Raupe zu verpuppen und zur neuen Wespe zu werden. Die Wespe hat sich vermehrt und ihre kleine Nachkommenschaft mit Futter versorgt, und die Pflanze wird von ihren Schädlingen befreit – ein sonderbares Bündnis zwischen Wespe und Pflanze, vermittelt durch organische Moleküle. Das ist nur eine Episode in der endlosen Seifenoper der Natur: produziert, finanziert und unterstützt von organischen Molekülen.

Vermutlich haben sich die meisten Studenten zu Beginn ihres Studiums so gefühlt und wahrscheinlich sogar ihre Professoren, bevor sie Professor wurden. *Sie sind also nicht allein.* Aber Sie können mir glauben, dass die organische Chemie nicht so hart ist, wie sie aussieht. Diejenigen, die kontinuierlich ihr Lernpensum erfüllen – das ist allerdings nicht wenig – und nicht zurückfallen, werden fast immer als Gewinner den Platz verlassen. (Im Kapitel 18 erhalten Sie wertvolle Tipps, wie Sie die Organik meistern können.) Die organische Chemie belohnt die harten Arbeiter (wie Sie) und bestraft unbarmherzig die Faulen (die anderen in Ihrer Klasse). Wenn Sie viel lernen, werden Sie auch nicht durchfallen.



Ich hoffe, das ganze Gerede hat Ihrem Enthusiasmus keinen Dämpfer verpasst, denn die organische Chemie ist klasse. Wenn Sie organische Chemie lernen, lernen Sie etwas über sich selbst, denn alle Lebewesen sind aus organischen Molekülen zusammengesetzt und benötigen organische Substanzen, um zu funktionieren. Schwärme von organischen Molekülen sind gerade damit beschäftigt, Ihre Körperfunktionen aufrechtzuerhalten – sie versorgen Ihr Gehirn mit Nährstoffen, halten Ihre Neuronen unter Dampf und helfen Ihren Muskeln, damit Sie Ihren Mund öffnen und schließen können – und das ist nur eine kleine Auswahl dessen, wozu organische Substanzen in der Lage sind.

Menschen sind fast komplett aus organischen Molekülen aufgebaut (jedenfalls alle Weichteile), von den Muskeln über das Haar und die inneren Organe bis zu den Fettpolstern, die Sie immer schön warm halten, wenn Sie lange lauwarmer Sommernächte durchfeiern (manche sind damit etwas reicher gesegnet als andere). Organische Moleküle können ganz klein sein wie das Kohlendioxid, das Sie ausatmen und das aus nur drei Atomen besteht, oder sie können riesig sein, wie die DNA, die Ihre molekulare Gebrauchsanweisung ist und aus Millionen von Atomen besteht.

## Was genau sind eigentlich organische Moleküle?

Aber was ist die Gemeinsamkeit all dieser Moleküle? *Was genau* macht ein Molekül organisch? Die Antwort liegt in einem einzelnen, wertvollen Atom: dem Kohlenstoffatom. Alle organischen Moleküle enthalten Kohlenstoff, und das Studium der organischen Chemie ist das Studium von Molekülen, die Kohlenstoff enthalten (aus historischen Gründen werden jedoch die Kohlensäure und ihre Salze, die Carbonate und Hydrogencarbonate, nicht zur organischen Chemie gerechnet). Die organische Chemie untersucht, welche Arten von Reaktionen diese Moleküle auszeichnen und wie sie zusammengesetzt sind. Wenn diese Prinzipien bekannt sind, können sie auf eine Vielzahl von Einsatzgebieten angewendet werden: die Herstellung von wirksamen Medikamenten, besseren Kunststoffen, Materialien für kleinere und noch schnellere Computerchips, leuchtenden Farbstoffen, Färbemitteln, Beschichtungen und Polymeren, Millionen andere Dinge, die helfen, unsere Lebensqualität zu verbessern.

Die Abgrenzung der organischen Chemie ist letztlich willkürlich. Hier gelten dieselben Grundprinzipien der Chemie, die auch für anorganische Verbindungen gelten. Dieser Zusammenhang der Zweige der Chemie ist eine relativ neue Einsicht, die die falsche

Annahme des *Vitalismus* ablöste, das Postulat, organische Moleküle müssten aus der Natur stammen und könnten nicht auf synthetischem Wege hergestellt werden (Genauer dazu erfahren Sie im Kapitel 20 bei Friedrich Wöhler). Trotz der Ablösung dieser Theorie halten sich Chemiker immer noch an die historisch gewachsene Einteilung der Chemie, die die Chemie in physikalische Chemie, anorganische Chemie, analytische Chemie, organische Chemie und Biochemie aufteilt. Diese Grenzen lösen sich aber langsam auf und dienen heute hauptsächlich noch dazu, um die Menge des Stoffs gerade für Studenten sinnvoll zu gliedern.

Es ist faszinierend, dass bei der Vielzahl aller Elemente im Weltall der Kohlenstoff als Grundbaustein aller Lebewesen ausgewählt wurde. Was macht Kohlenstoff so speziell, so einzigartig? Was macht ihn als Grundlage des Lebens geeigneter als die anderen Elemente? Was macht dieses Atom so wichtig, dass sich ein komplettes Fachgebiet um dieses einzelne Atom dreht, während die Chemie aller anderen Elemente in einen großen (als anorganische Chemie bezeichneten) Eintopf geworfen wird? Ist Kohlenstoff vergleichen mit anderen Elementen wirklich so speziell, dass er als Grundlage des Lebens ausgewählt werden musste?

Kurz gesagt: ja. Kohlenstoff ist ein ganz besonderes Element, und seine Nützlichkeit liegt in seiner Vielseitigkeit. Kohlenstoff kann vier Bindungen eingehen. Daher können Moleküle, die Kohlenstoff enthalten, sehr unterschiedlich und sehr kompliziert gebaut sein. Außerdem ermöglichen Kohlenstoffverbindungen einen perfekten Kompromiss zwischen Stabilität und Reaktionsfähigkeit. Kohlenstoffbindungen sind weder zu stark noch zu schwach. Stattdessen verkörpern sie, was Chemiker als goldenen Mittelweg bezeichnen. Die Bindungen, die der Kohlenstoff ausbildet, sind weder »zu heiß« noch »zu kalt«, sie sind »gerade richtig.« Wenn die Bindungen zu stark wären, wäre Kohlenstoff unreaktiv und für Organismen nutzlos. Wenn sie zu schwach wären, wären sie instabil und damit ebenfalls von begrenztem Wert. Stattdessen liegen die Bindungen des Kohlenstoffs zwischen beiden Extremen: weder zu stark noch zu schwach, sind sie das Rückgrat des Lebens.

Außerdem ist Kohlenstoff eines der wenigen Elemente, das stabile Bindungen mit sich selber ausbilden kann. Er ist zudem im Stande, mit vielen anderen Elementen Bindungsverhältnisse einzugehen. Kohlenstoffbindungen können sogar Ringe bilden (siehe Kapitel 7). Wegen dieser Fähigkeit, mit sich selbst und anderen Elementen Verbindungen einzugehen, kann Kohlenstoff eine unzählbare Reihe von Molekülen bilden. Viele Millionen von organischen Verbindungen sind bereits synthetisiert und charakterisiert worden und zweifellos werden viele weitere Millionen noch entdeckt werden (vielleicht durch Sie!).

## Namen sind Schall und Rauch ...

Wie das Gebiet der Chemie in verschiedene Zweige aufgeteilt werden kann, kann auch die organische Chemie in Spezialgebiete eingeteilt werden. Die spezialisierten Organiker, die in diesen verschiedenen Gebieten arbeiten, illustrieren die Vielfalt der organischen Chemie und ihrer Verbindung zu anderen Bereichen der Chemie wie der physikalischen Chemie, der Biochemie oder der anorganischen Chemie.

## Synthese-Chemiker

*Synthese-Chemiker* (den Kalauer »synthetischer Chemiker« verkneife ich mir an dieser Stelle) beschäftigen sich mit der Herstellung organischer Moleküle. Synthese-Chemiker interessieren sich besonders dafür, aus preiswerten und einfach verfügbaren Ausgangsmaterialien wertvolle Produkte herzustellen. Einige Synthese-Chemiker widmen sich der Entwicklung von Verfahren, die von anderen für die Synthese komplizierter Moleküle verwendet werden können. Sie wollen allgemeine Methoden finden, die flexibel sind und für die Synthese vieler verschiedener Arten von Molekülen verwendet werden können. Andere widmen sich der Erforschung von Reaktionsmechanismen spezieller Bindungen wie beispielsweise der Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen.

Andere nutzen bekannte Vorgehensweisen, um mehrstufige Synthesen durchzuführen – die Bildung komplexer Substanzen unter Verwendung mehrerer bekannter Reaktionen. Die Durchführung dieser mehrstufigen Synthesen geht an die Grenzen der bekannten Verfahren. Sie zwingen den Chemiker zu Innovation und Kreativität. Er muss hartnäckig und flexibel sein, wenn ein Schritt der Synthese fehlschlägt (irgendwas geht bei der Synthese komplexer Verbindungen immer schief). Solche Neuerungen tragen zum allgemeinen Verständnis der organischen Chemie bei.

Synthese-Chemiker zieht es häufig in die pharmazeutische Industrie, wo sie effiziente Wege entwickeln, um Medikamente herzustellen und Reaktionen zu optimieren, um sehr komplizierte organische Moleküle so preiswert wie möglich für den Einsatz als Arzneimittel zu produzieren (Manchmal kann die Verbesserung der Ausbeute einer Substanz bei der Herstellung eines Medikamentes um einige Prozent einige Millionen Euro wert sein!). Wenn Sie ein Praktikum in der organischen Chemie absolvieren, werden Sie viel mit der organischen Synthese zu tun bekommen.

## Bioorganiker

*Bioorganiker* interessieren sich besonders für die Enzyme lebender Organismen. Enzyme sind sehr große organische Moleküle, die Arbeitsbienen der Zellen, die bestimmte chemische Reaktionen in der Zelle katalysieren. Es gibt weniger wichtige Enzyme (vom Standpunkt eines durchschnittlichen Studenten aus betrachtet), mittelwichtige wie die, die unser Essen in Energie umwandeln, und wirklich wichtige wie zum Beispiel die Hefe, die für die alkoholische Gärung verantwortlich ist, die Umwandlung von Zucker in Alkohol.

Diese Katalysatoren arbeiten mit einer Leistungsfähigkeit und Selektivität, die Synthese-Chemiker (siehe den vorherigen Abschnitt) vor Neid gelb werden lässt. Bioorganiker interessieren sich besonders für diese Wunder der Natur, die Enzyme und ihre Funktionsweise. Wenn Chemiker die Mechanismen verstehen, wie diese Enzyme arbeiten und spezifische Reaktionen in der Zelle katalysieren, kann dieses Wissen zur Bildung von *Inhibitoren* verwendet werden. Inhibitoren sind Moleküle, die Enzyme blockieren.

Viele moderne Medikamente beruhen auf Inhibitoren. Aspirin ist beispielsweise ein Inhibitor des intrazellulären Enzyms Cyclooxygenase (COX). Die Cyclooxygenase ist

für die Erzeugung der Schmerztransmitter (Prostaglandine) im Körper verantwortlich. Diese Transmitter sind die Boten, die Ihrem Gehirn mitteilen, dass Sie starke Schmerzen im Daumen haben, weil Sie sich gerade mit dem Hammer draufgeschlagen haben. Wenn das Aspirin diese COX-Enzyme in ihrer Funktion behindert, können die Enzyme in Ihrem Körper die Prostaglandine nicht mehr produzieren. So wird das Schmerzgefühl im Körper reduziert. Es gibt viele solcher Beispiele von Enzyminhibitoren in der modernen Medizin, und diese Medikamente wurden von bioorganischen Chemikern erschaffen. Außerdem erproben Bioorganiker, welche Reaktionen die Enzyme noch ausführen können. Dadurch können sie das Leben der Synthese-Chemiker erheblich erleichtern, da dieser mit Hilfe von Enzymen Reaktionen durchführen kann, die sonst gar nicht oder nur sehr schwer durchzuführen wären.

## Naturstoff-Chemiker

*Naturstoff-Chemiker* isolieren Substanzen aus Lebewesen. Organische, aus lebenden Organismen isolierte Verbindungen werden *Naturprodukte* genannt. In der Geschichte wurden Medikamente schon immer aus Naturprodukten gewonnen; erst in neuerer Zeit werden Medikamente auch direkt im Labor gefunden. *Penicillin* ist ein Beispiel für ein Naturprodukt, das von einem Pilz produziert wird. Dieses berühmte Heilmittel tötet gefährliche Bakterien und hat damit Millionen von Menschenleben gerettet. Die Heileigenschaften von Kräutern und Tees und anderer »Hexengebräue« beruhen meist auf der Wirkung natürlicher Substanzen, die in den Pflanzen enthalten sind. Einige Indianerstämme kauten Weidenrinde, um den Schmerz zu lindern. Die Rinde enthält den wirksamen Bestandteil des Aspirins; andere Indianerstämme kauten *Peyote*, der einen natürlichen Wirkstoff mit halluzinatorischen Eigenschaften enthält. Raucher bekommen ihren Kick durch das *Nikotin*, einen natürlichen Inhaltsstoff der Tabakpflanze; Kaffeetrinker erfreuen sich an der Wirkung des *Koffeins*, eines natürlichen Bestandteils der Kaffeebohnen.

Auch heute stammen viele der Medikamente in den Schubladen unserer Apotheken von Naturprodukten ab. Sie werden häufig aus den Pflanzen isoliert und dann von Chemikern auf eine mögliche biologische Aktivität untersucht. Zum Beispiel kann man ein Naturprodukt daraufhin untersuchen, ob es vielleicht Bakterien oder Krebszellen töten kann oder ob es vielleicht entzündungshemmend wirkt. Wenn sie einen Treffer landen, verändern Chemiker die Struktur des Naturstoffs oft noch etwas, um die Wirkung noch zu verstärken oder unerwünschte Nebenwirkungen zu verringern. Auch versuchen sie, diesen Naturstoff in einer Totalsynthese, von einem ganz einfachen und kleinen Molekül ausgehend, in vielen Schritten komplett aufzubauen. Das kann sehr sinnvoll sein, wenn ein Naturstoff sehr selten vorkommt, man diesen aber in großen Mengen für Medikamente benötigt.

## Physiko-Organiker

*Physiko-Organiker* interessieren sich dafür, warum sich Atome so verhalten, wie sie es tun. Einige von ihnen widmen sich der Modellierung des Verhaltens von chemischen Systemen und dem Verständnis der Reaktivität und Eigenschaften von Molekülen. Andere haben sich der Bestimmung von Reaktionsgeschwindigkeiten verschrieben; dieses Spezialgebiet wird *Kinetik* genannt. Noch andere erforschen die Energie von Molekülen und gebrauchen

Gleichungen, um zu beschreiben, wie groß die Produktmenge im *Gleichgewicht* ist; dieses Gebiet wird *Thermodynamik* genannt. Physiko-Organiker befassen sich auch mit der Spektroskopie und der Photochemie, die den Einfluss des Lichts auf Moleküle erkunden. (Die Photosynthese ist vermutlich das bekannteste Naturbeispiel der Wechselwirkung von Licht und Molekülen.)

## Organometall-Chemiker

*Organometall-Chemiker* interessieren sich für Moleküle, die sowohl Kohlenstoff als auch Metalle enthalten. Solche Moleküle finden beispielsweise bei der Katalyse chemischer Reaktionen Anwendung (Katalysatoren erhöhen die Reaktionsgeschwindigkeit). Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen sind stabiler als Kohlenstoff-Metall-Bindungen, daher können Kohlenstoff-Metall-Bindungen leichter gebildet, aber auch leichter gespalten werden. Daher sind sie bei der Katalyse der chemischen Umwandlungen organischer Moleküle wichtig. Viele Organometall-Chemiker beschäftigen sich mit der Optimierung organometallischer Katalysatoren für spezielle Reaktionsmechanismen.

## Computer-Chemiker

Die immer schnelleren Computer helfen auch in der Chemie. Chemiker verwenden die Rechenknechte, um ihre theoretischen Untersuchungen des Verhaltens von Atomen und Molekülen zu unterstützen. *Computer-Chemiker* (auch Theoretische Chemiker genannt) entwerfen Substanzen (sowohl anorganische als auch organische) am Computer und berechnen viele ihrer Eigenschaften. Sie interessieren sich vor allem für dreidimensionale Molekülstrukturen und deren Energiegehalt.

Die von den Computer-Chemikern erzeugten Modelle werden immer wirklichkeitstreu, je mehr Rechenleistung zur Verfügung steht. Viele Medikamente werden heute von Computer-Chemikern am Computer entwickelt; dieser Vorgang wird *in silico* (vom chemischen Element Silicium) genannt, was zeigen soll, dass ein Medikament auf dem Computer entworfen wurde. Medikamente wirken häufig durch die Blockade eines Enzymrezeptors (siehe die Erläuterung des Bioorganikers). Die Medikamentenentwicklung *in silico* macht es möglich, viele verschiedene Substanzen zuerst am Computer zu modellieren und ihre Eigenschaften zu testen, um schon in diesem Stadium diejenigen Strukturen auszuwählen, die am besten zu dem gewünschten Rezeptor passen. Dadurch wird eine gezielte Synthese von Medikamenten möglich, die Erschaffung eines Medikaments durch logische Analyse seiner Wirkung und der dazu benötigten Strukturelemente. Die »brute-force«-Methode, das ziellose Testen von zahllosen möglichen Wirksubstanzen auf biologische Aktivität, gehört damit der Vergangenheit an.

## Materialchemiker

*Materialchemiker* befassen sich, wie könnte es anders sein, mit Materialien. Plastik, Polymere, Beschichtungen, Farben und Färbemittel stehen auf der Liste des Materialchemikers. Er arbeitet sowohl mit anorganischen als auch mit organischen Materialien, aber die

meisten Verbindungen von Interesse sind organische Substanzen. Teflon ist ein organisches Polymer, das Ihr Omelett vor dem Anpappen bewahrt. Polyvinylchlorid (PVC) ist ein Polymer, aus dem viele Verpackungen oder Rohre hergestellt werden, und Polyethylen wird für Milchtüten und Teppiche verwendet. Chemiker, die sich hauptsächlich mit Polymeren beschäftigen bezeichnen sich daher auch als Polymer-Chemiker.

Materialchemiker stellen auch umweltverträgliche Waschmittel mit optimaler Waschkraft her. Organische Materialien werden für die Herstellung kleinerer, schnellerer und zuverlässiger Computerchips eingesetzt. Alle diese Anwendungen und Millionen andere machen den Alltag des Materialchemikers aus.