

Einfluss der Temperatur auf die Enzymkatalyse

Aufgaben zur Erarbeitung des Lernstoffes:

- f1 **Definiere** das Temperaturoptimum einer Enzym-Reaktion!
- f2 **Skizziere** eine Kurve zur Darstellung der Enzym-Aktivität in Abhängigkeit von der Temperatur und erkläre den Verlauf der Kurve!
- f3 **Skizziere** und erkläre separate Kurven der Enzym-Aktivität bei einer Rückkehr zum Temperaturoptimum ausgehend von Temperaturen weit unterhalb bzw. oberhalb!
- f4 **Entwickle** ein Experiment zur Ermittlung eines Temperaturoptimums einer Enzym-Reaktion!
- f5 **Skizziere** eine grafische Darstellung der zu erwartenden experimentell gewonnenen Daten!
- f6 **Entwickle** eine Hypothese zur Erklärung eines Nachteils wechselwarmer Tiere hinsichtlich der Evolution ihrer Enzyme!

möglicherweise neue "Fachbegriffe":

Denaturierung bedeutet im Zusammenhang mit Proteinen und DNA die Auflösung der normalen, räumlichen Struktur, also die Entfaltung von Proteinen bzw. die Aufspaltung der DNA-Doppelhelix in zwei DNA-Einzelstränge.

Maximum nennt man ein Höchstmaß, einen oberen Extremwert oder einen höchsten Wert in einer Reihe von Werten.

RGT-Regel oder (Reaktionsgeschwindigkeit-Temperatur-Regel) ist eine grobe Faustregel. Sie besagt, dass im Bereich der für Menschen üblichen Außentemperaturen eine Temperaturerhöhung um 10 °C ungefähr eine Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit chemischer Reaktionen bewirkt. Die Reaktionsgeschwindigkeit nimmt also mit steigender Temperatur nicht linear zu, sondern immer stärker zunehmend (+10=2x, +20=4x, +30=8x).

separat = eigenständig, unabhängig oder getrennt von etwas anderem

Skale oder **Skala** nennt man die Unterteilungsstriche auf der Anzeige eines analogen Messgeräts wie einem Geigerzähler, die Unterteilungsstriche auf einer Anzeige wie einer Uhr oder einem analogen Radio oder eine Zuordnungstabelle wie die Notenskalen für die Bewertung einer Klausur.

skizzieren = Sachverhalte, Strukturen oder Ergebnisse auf das Wesentliche reduziert übersichtlich graphisch darstellen

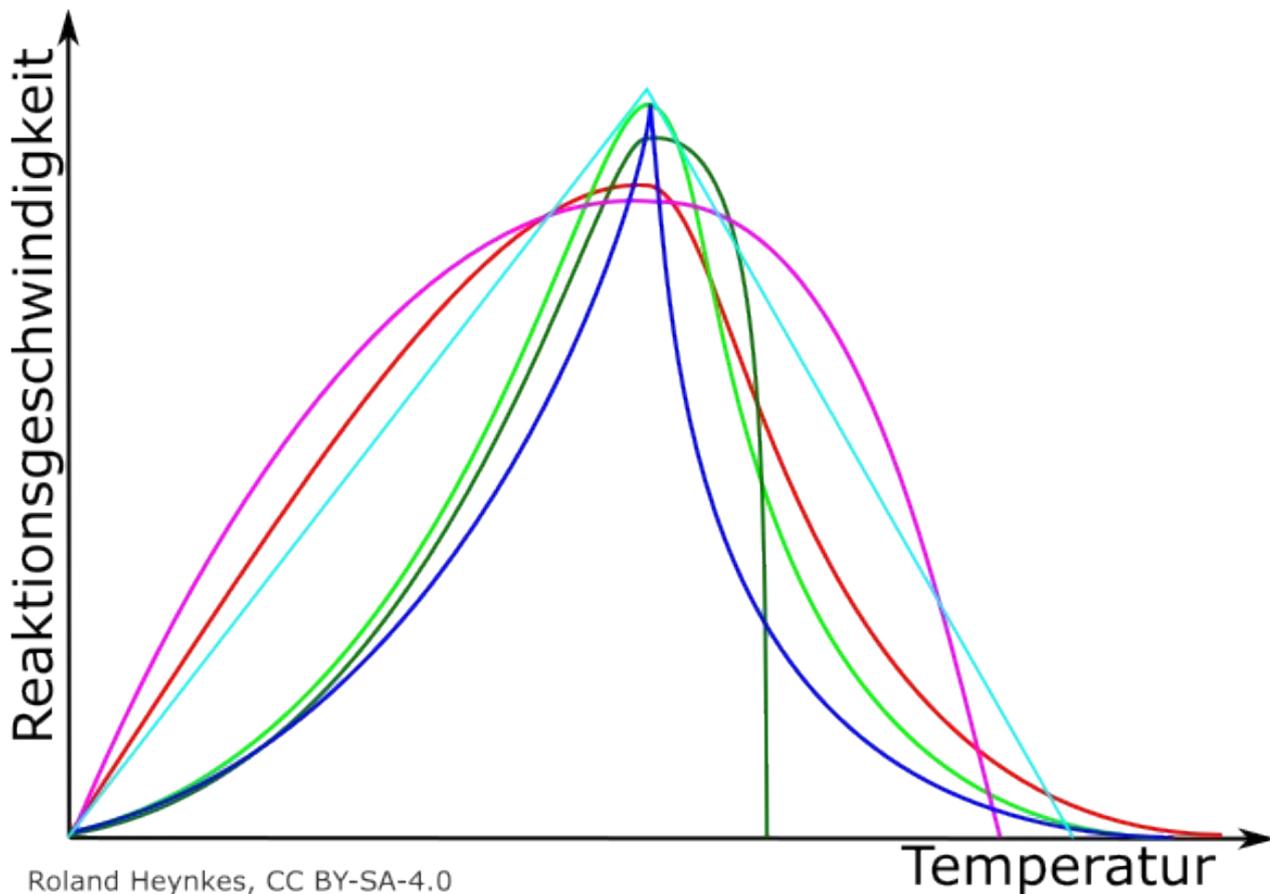
Temperaturoptimum einer Enzym-Reaktion heißt die Temperatur, bei welcher die Reaktionsgeschwindigkeit maximal ist.

Wärmebewegung heißt die ungeordnete Bewegung der kleinsten Materie-Teilchen, deren Heftigkeit mit der Temperatur zunimmt.

Bis zum Erreichen des Temperaturoptimums steigt mit zunehmender Umgebungstemperatur auch die Reaktionsgeschwindigkeit an. Am Temperaturoptimum erreicht die Reaktionsgeschwindigkeit ihr Maximum. Sie steigt also trotz weiter zunehmender Umgebungstemperatur nicht weiter an. Bei Temperaturen oberhalb des Temperaturoptimums nimmt die Reaktionsgeschwindigkeit wieder ab.

Soweit scheint die Sache einfach zu sein, bis man das so leicht daher Gesagte in einem Diagramm zu skizzieren versucht. Während nämlich Texte häufig Unwissenheit verschleiern, fällt sie in Zeichnungen bzw. schon beim Zeichnen meistens auf. Folgende Kurvenschar soll das verdeutlichen.

verschiedene den Text korrekt wiedergebende Kurven



Dieses Diagramm zeigt, wie uneindeutig der Text formuliert ist. Alle diese Kurven geben ihn korrekt wieder, aber nur eine ist wirklich eine typische Darstellung der Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit eines Enzyms.

Nun muss man also doch noch einmal darüber nachdenken, welcher der vielen denkbaren Kurvenverläufe korrekt ist.

Das Temperaturoptimum einer Enzym-Reaktion ist die Temperatur, bei welcher die Reaktionsgeschwindigkeit maximal ist.

Unterhalb des Temperaturoptimums nimmt die Reaktionsgeschwindigkeit ähnlich wie bei ohne Katalysator ablaufenden chemischen Reaktionen zu, weil die Substrate aufgrund zunehmender Wärmebewegung häufiger auf das Enzym stoßen und weil sich die Produkte schneller von den Enzymen lösen.

Dabei nimmt aber die Reaktionsgeschwindigkeit mit steigender Temperatur nicht linear zu, sondern immer stärker zunehmend ($+10^{\circ}\text{C}=2x$, $+20^{\circ}\text{C}=4x$, $+30^{\circ}\text{C}=8x$). Diesen Effekt erklärt die RGT-Regel (Reaktionsgeschwindigkeit-Temperatur-Regel) für die Temperaturabhängigkeit chemischer Reaktionen (nicht nur Enzym-katalysierte). Diese Faustregel besagt, dass im Bereich der für Menschen üblichen Außentemperaturen eine Temperaturerhöhung um 10°C ungefähr eine Verdoppelung bis Verdreifachung der Reaktionsgeschwindigkeit bewirkt.

Die Zunahme der Reaktionsgeschwindigkeit durch steigende Temperatur ist reversibel. Man kann die Temperatur mehrfach steigern und wieder absenken und dabei folgt die Reaktionsgeschwindigkeit rauf und runter immer dem durchhängenden Kurvenverlauf.

Selbst extrem tiefe Temperaturen schaden Enzymen nicht, sondern inaktivieren sie nur reversibel.

Kurz vor dem Erreichen des Temperaturoptimums steigt trotz weiter zunehmender Umgebungs-Temperatur die Reaktionsgeschwindigkeit immer langsamer an.

Die Ursache dafür ist eine zunehmende Behinderung der Substrat-Bindung und/oder der Katalyse durch die zunehmende Bewegung der Atome des Enzyms. Dadurch hat das Enzym immer öfter und an immer mehr Stellen nicht mehr die optimale Form.

Rechts vom Temperaturoptimum nimmt die Reaktionsgeschwindigkeit erst langsam und dann immer schneller ab.

Die Ursache dafür ist die Denaturierung, also die Auflösung der räumlichen Strukturen des Enzyms aufgrund der immer wilder werdenden Wärmebewegungen seiner Atome. Anfangs wird dieser Zerfall noch aufgehalten, weil sich die Atome durch ihre chemischen Bindungen innerhalb der Sekundär- und Tertiärstrukturen gegenseitig stabilisieren. Aber das Reißen der ersten chemischen Bindungen destabilisiert weitere Bindungen, sodass die zunächst noch verzögerte Auflösung der Tertiärstruktur des Enzyms dann doch immer schneller erfolgt.

Senkt man nach der Denaturierung der Enzyme die Temperatur wieder ab, dann bleibt die Reaktionsgeschwindigkeit nahe Null, weil nur wenige denaturierte Enzyme bei Normalisierung der Temperatur wieder zu ihren funktionsfähigen Formen zurück finden. Sie verlieren deshalb ihre Aktivität dauerhaft, also irreversibel.

Links vom Temperaturoptimum sind also nur die beiden grünen und die dunkelblaue Kurve korrekt, wobei die blaue oben verdächtig spitz ausläuft. Derart scharf werden Enzyme nicht wirklich auf Temperaturänderungen reagieren. Den beschleunigten Abfall der Reaktionsgeschwindigkeit bei Temperaturen oberhalb des Temperaturoptimums gibt nur die dunkelgrüne Kurve richtig wieder und ist deshalb insgesamt die einzig richtige Grundform, von der die Temperaturkurven verschiedener Enzyme nur in den Feinheiten abweichen. Es gibt allerdings auch Enzyme, die beim Abkühlen von selbst wieder in ihre funktionsfähige Form zurückfinden und dann wieder aktiv sind.

Die in Aufgabe f2 skizzierte Kurve sollte das grafisch darstellen. Statt einem einzigen Diagramm kann man verschiedene Aspekte der Temperaturabhängigkeit von Enzymen in separaten Diagrammen und unterschiedlichen Temperatur-Skalen darstellen (siehe Aufgabe 3).

Weil Lebewesen mit nicht optimal arbeitenden Enzymen im Kampf ums Überleben und erfolgreiche Fortpflanzung Nachteile haben, dürften bei Lebewesen mit konstanter Körpertemperatur die Temperaturoptima der allermeisten Enzyme nahe dem oberen Ende der Temperaturen liegen, bei denen sie normalerweise arbeiten müssen. Die Temperaturoptima der meisten menschlichen Enzyme liegen wohl um die 39°C [Universität Ulm - Tierphysiologisches Anfängerpraktikum - Stoffwechselphysiologie - Enzymkinetik Seite 7]. Ich habe allerdings mehr Quellen gefunden, in denen als Temperaturoptimum 37°C genannt wird [DocCheck Flexikon Temperaturoptimum, Lernhelfer - Enzyme, Temperaturabhängigkeit der Katalaseaktivität]. Viel problematischer ist die evolutionäre Anpassung der Temperaturoptima bei Lebewesen, deren Körpertemperaturen unter dem Einfluss von Strahlungsenergie rasch ansteigen oder einfach den Umgebungstemperaturen folgen. Ihre Enzyme müssen mit einem breiten Temperatur-Spektrum zurechtkommen und können daher kaum für eine Temperatur optimiert werden.

Bei Lebewesen mit konstanten Körpertemperaturen haben sich die Temperaturoptima ihrer Enzyme evolutionär an ihre Körpertemperaturen angepasst. Wechselwarme Lebewesen haben dafür den Vorteil, erheblich weniger Energie zu verbrauchen.

Die Temperaturoptima von Enzymen liegen bei Warmblütern und bei Lebewesen in Lebensräumen mit konstanter Temperatur im Bereich der Körpertemperatur. Die liegt bei gesunden Menschen zwischen 36 und 37°C. Die normale Körpertemperatur liegt bei Vögeln tagsüber je nach Vogelart zwischen 38 und 43°C. Nachts lassen viele Vögel ihre Körpertemperatur stark absinken, um Energie zu sparen. Die Vogel-Enzyme müssen an die höhere Körpertemperatur des Tages angepasst sein, denn erstens dürfen sie nicht bei diesen hohen Temperaturen denaturieren und zweitens müssen die meisten Enzyme vor allem dann schnell arbeiten, wenn ein Organismus aktiv ist.

Da sich Milchsäure-Bakterien bei Raumtemperatur sehr schnell vermehren, dürfte das Temperaturoptimum ihrer Enzyme auch in diesem Temperaturbereich liegen. Wenn man das aber wirklich wissen will, dann muss man es experimentell untersuchen (siehe die Aufgaben f4 und f5).