

## Wärmeentwicklung bei der Keimung

### Experimente zur Bestimmung der Keimungswärme

Helmut Vogt, Thomas Schröer und Judith Eschbach

#### **Kurzfassung**

*Bekanntlich findet infolge von Stoffwechselaktivität bei der Samenkeimung eine Wärmeentwicklung statt. Bei entsprechender Wärmeisolierung von einer größeren Anzahl keimender Samen, ist die Wärmeentwicklung als Temperaturerhöhung zu messen. Mit entsprechenden Experimenten wird aufgezeigt, dass die detektierten Werte bei Versuchsansätzen wie z. B. bei TROLL, 1973; KRÜGER, 1978; SCHWARZMAIER, 1986 und auch bei KUHN & PROBST, 1983 nicht allein von der Stoffwechselaktivität der keimenden Samen stammen, sondern ein beachtlicher Anteil mikrobiellem Stoffwechsel zuzuschreiben ist. Außerdem wird aufgezeigt, dass nach Desinfektion des Saatgutes (Erbsen, Mais und Mungobohnen) Temperaturen von über 60 °C während der Keimung nicht erreicht werden können.*

## 1 Einleitung

Die Wärmeentwicklung durch Stoffwechselfvorgänge ist allgemein aus der Zoologie bekannt. Meist weniger beachtet und somit auch weniger publik ist die Wärmeentwicklung bei Pflanzen. Bereits quellende und keimende Samen zeigen eine Wärmeentwicklung mit zwei Temperaturmaxima (AICHELE & LEHMANN, 1931). Das erste Maximum ist durch die Quellung bedingt und dadurch physikalischen Ursprungs. Nach Erreichen des Quellungsmaximums sinkt die Temperatur wieder auf ihren Anfangswert zurück. Das zweite Maximum in der Temperaturkurve quellender und keimender Samen hat physiologische Prozesse zur Grundlage. Ausschließlich diese Wärmeentwicklung liegt im Fokus der nachfolgenden Untersuchungen.

Die Wärmeentwicklung und die dadurch bedingte Wärmeabgabe beruht auf frei werdender Atmungsenergie bei der Keimung. Sie ist ein allgemein bekannter, jedoch in seiner Quantität bis heute unzureichend erfasster physiologischer Sachverhalt. Es wurden zwar für den Unterricht einige Methoden zur

Messung von Keimungswärme entwickelt, im Grunde aber weisen diese meist zwei systematische Fehler auf. Entweder wurden Stoffwechselprozesse von im Versuchsaufbau auftretenden anaerob dissimilierenden Organismen gar nicht erst beachtet und die gemessene Temperaturerhöhung ausschließlich den keimenden Samen zugeordnet (z. B. TROLL, 1973, 543; KRÜGER, 1978, 100; SCHWARZMAIER, 1986) oder die Problematik wurde erkannt, bei der Versuchsdurchführung aber dennoch nicht konsequent umgesetzt (z. B. KUHN & PROBST, 1983, 334).

Es ist einleuchtend, dass ein Wert, der als „Keimungstemperatur“ bezeichnet wird, korrekterweise um den Wärmebetrag vermindert werden muss, der anaerob dissimilierenden Mikroorganismen zuzuschreiben ist. Es galt nun eine Methode aufzuzeigen, mit deren Hilfe ausschließlich die keimungsgenuine Wärmeentwicklung gemessen werden kann. In diesem Zusammenhang wurde für die Versuchsreihen die „Nettowärmeentwicklung“ als Begriff neu definiert. Messreihen sollten Aufschluss über die Beträge der Wärmemengen geben, die bedingt sind durch mikrobielle und pflanzliche Stoffwechselaktivität bei der Keimung verschiedener Pflanzenarten.

## 2 Vorüberlegungen zur Entwicklung einer Messmethode

Zunächst die Betrachtung der Messmethode von KUHN & PROBST (1983, 334):

In ein Isoliergefäß (Thermosflasche) mit 500 ml Fassungsvermögen werden zuunterst feuchte Filterpapierschnitzel, anschließend 200 g gequollene Erbsen gegeben. Ein Quecksilberthermometer wird zwischen die Erbsen platziert und das Isoliergefäß mit Watte verschlossen. Über 4 Tage wird die Temperatur im Keimgefäß und dazu die Raumtemperatur bestimmt. KUHN & PROBST (1983, 334) weisen darauf hin, dass es ab dem dritten Tag zur bakteriellen Gärung kommen kann. Die gemessene Temperatur wird mit über 60 °C angegeben.

Es liegt die Vermutung nahe, dass aufgrund der Erbsenmenge, sowie des Verschlusses des Isoliergefäßes mit Watte, schon vor der angegebenen Zeit anaerobe Bedingungen in dem Gefäß herrschen. Es galt nun, eine Methode zu entwickeln, die eine möglichst wirkungsvolle Isolierung der Stoffwechselwärme ohne Sauerstoffabschluss gewährleistet. Des Weiteren war zu prüfen, ob Samen bei Temperaturen von über 60 °C überhaupt noch lebensfähig sind. Hinsichtlich dieser Überlegungen wurden gezielte Messreihen notwendig, bei denen die Keimungsaktivität des Saatgutes in Abhängigkeit von der Temperatur überprüft werden konnte.

### 3 Vorgehensweise

#### 3.1 Entwicklung der Messmethodik

In Anlehnung an Experimente von KUHN & PROBST (1983, 334) und SCHWARZMAIER (1986) wurden Erbsen (*Pisum sativum*) für die Experimente gewählt. Parallel dazu wurden Versuchsreihen mit Mais (*Zea mays saccharata*) und Mungobohnen (*Vigna radiata*) durchgeführt. (Diese Pflanzen sind bezüglich der Keimung lichtindifferent.)

Die Samen wurden unter fließendem Leitungswasser „vorgequollen“, damit man stets von ausreichend zur Verfügung stehendem Sauerstoff für die beginnenden Stoffwechselprozesse ausgehen konnte. Außerdem vermutete schon MAZÉ (1900), dass bei stehendem Wasser nicht nur die direkte Wirkung des Sauerstoffmangels eine keimungshemmende Rolle spielt, sondern auch die Ansammlung toxischer Stoffe.

Das Isoliergefäß für die Messung der Wärmeentwicklung der keimenden Samen wurde nicht verschlossen, sondern blieb zwecks Gasaustausch geöffnet. Feuchte Filterpapierschnipsel als Unterlage für die Samen (vgl. KUHN & PROBST, 1983, 334) wurden nicht verwendet, da ihnen Mikroorganismen anhaften könnten. Zudem wurde bei einer 14-stündigen Messdauer kein zusätzliches Wasser für die keimenden Samen benötigt, da bei der Atmung neben CO<sub>2</sub> auch H<sub>2</sub>O abgegeben wird.

Für jede Messreihe wurden 40 g Samen (Trockengewicht) eingesetzt, da eine größere Menge rascher anaerobe Verhältnisse schaffen würde. Zur ständigen Kontrolle des Sauerstoffgehaltes in dem Isoliergefäß wurde eine Sauerstoffelektrode möglichst zentral zwischen den Samen platziert und die Sauerstoffwerte im selben Rhythmus wie die Temperatur kontrolliert.

##### 3.1.1 Temperaturgrenzen

Für jede eingesetzte Samenart wurde die maximale Temperaturgrenze für eine Keimung ermittelt. Diese Temperaturgrenzen dürfen bei den Keimungsexperimenten nicht überschritten werden.

Zur Quellung wurde aus praktikablen Gründen nicht das entsprechende Temperaturoptimum vorab eingestellt. Die Temperatur nimmt zwar auf die Quellungsdauer Einfluss, jedoch wird das Quellungsergebnis letztendlich nicht beeinträchtigt (GESSNER, 1956, 241).

Gequollene bzw. gekeimte Samen haben andere Temperaturtoleranzen als solche, bei denen die Stoffwechselfvorgänge noch nicht durch Quellung „in

Gang“ gekommen sind (AICHELE & LEHMANN, 1931, 220). So ist beispielsweise noch nicht gequollener Weizen nach einer Behandlung von 50 °C über 5 Stunden noch zu 60 % keimfähig, nach vorausgegangener 24-stündiger Quellung hingegen nur noch zu 22 % (HABERLANDT, 1875). Für diese Versuche ist es jedoch nicht von Bedeutung, wie die Samen im Zustand des latenten Lebens auf Temperatureinwirkungen reagieren. Relevant wird ihre Temperaturempfindlichkeit erst nach Einsetzen der Quellung.

Innerhalb einer Art können sich durch verschiedene Lagerungsbedingungen, verschiedene Behandlungsmethoden und durch unterschiedliches Alter der Samen verschiedene Temperaturgrenzen bei der Keimung ergeben. Nach Desinfektion der verwendeten Samen wurden deren individuellen Temperaturgrenzen mit Hilfe einer Temperaturorgel ermittelt (vgl. GÖNNER, 1987). Für *Pisum sativum* ergab sich so eine maximale obere Temperaturgrenze von 37 °C. Bei höheren Temperaturen trat die Radicula nicht aus, sichtbar werdende Keimungsprozesse fanden demnach nicht statt. Bei *Zeamays saccharata* ergab sich auf diese Weise für eine Keimung ein Temperaturmaximum von 38 °C, für *Vigna radiata* 37 °C. Vergleichsmessungen mit nicht desinfizierten Samen der ausgewählten Pflanzenarten erbrachten gleiche Ergebnisse.

### 3.1.2 Isolierung der Keimtemperatur

Zum Messen der Wärmeentwicklung wurden die gequollenen Samen in ein unverschlossenes Isoliergefäß gegeben. Die das Isoliergefäß umgebende Raumtemperatur konnte im Labor über einen Zeitraum von mehreren Stunden nicht konstant gehalten werden. Deshalb wurden die Isoliergefäße jeweils in einen gestellt, dessen Temperatur zu Beginn der Messreihen auf einen konstanten Wert eingestellt wurde. Die Temperatur innerhalb des Schrankes wurde zusätzlich mit einem Temperaturschreiber überprüft. Die stetig steigende Temperatur in dem Isoliergefäß, bedingt durch Atmungsprozesse der Samen, ergibt eine steigende Temperaturdifferenz zwischen dem Raum innerhalb des Gefäßes und dem Raum im Wärmeschrank. Je größer solch eine Differenz ist, desto stärker ist auch die Wärmeabgabe des Isoliergefäßes (→ Abkühlung). Diese Abkühlung wiederum wurde verzögert, indem die Temperatur des Wärmeschrankes bei jedem Ablesen der Sauerstoff- und Temperaturwerte innerhalb des Isoliergefäßes bis auf 2 °C darunter „nachgefahren“ wurde. Die Starttemperatur des Wärmeschrankes wurde bei jeder Messreihe auf 20 °C eingestellt. Vorversuche hatten gezeigt, dass bei Messbeginn dieser Wert nie unterschritten wurde.

### 3.1.3 Reduzierung der Mikroorganismenzahl

Pilze und Bakterien können die Keimung von Samen beeinträchtigen (vgl. HABERLANDT, 1875, 66; AICHELE & LEHMANN, 1931, 399; KUHN & PROBST, 1983, 334). Demnach wurde bei den Messreihen eine Desinfektion des Saatgutes angestrebt, die bei möglichst hohem Desinfektionsgrad eine möglichst geringe Keimschädigung zur Folge hat. Die Wirkung von einem Desinfektionsmittel ist nicht bei allen Samenarten identisch (vgl. PRINGSHEIM, 1930, 528; NIETHAMMER, 1926). Letztlich hat sich Natriumhypochlorit ( $\text{NaOCl} \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ) als günstig erwiesen.

Nach mehreren Tests erwies es sich für alle drei verwendeten Samenarten sinnvoll, die 12%ige Ausgangslösung mit aqua dest. auf eine 4%ige Gebrauchslösung zu verdünnen und das Saatgut 45 Min. darin zu inkubieren. Um mit der Desinfektion auch die Mikroorganismen in den „Faltungen“ der Samenschale zu erreichen, wurde in die NaOCl-Lösung direkt nach Zugabe der Samen ein Tropfen Spülmittel (Pril) gegeben. So wurde die Oberflächenspannung der NaOCl-Lösung verringert und das Desinfektionsmittel konnte in Kontakt mit möglichst der gesamten Oberfläche des Saatgutes treten (vgl. NIETHAMMER, 1926).

Da nicht alle Geräte, die mit den Samen in Berührung kamen, eine Hitzesterilisation vertragen, wurden diese vor dem Gebrauch eine Stunde in Natriumhypochlorit (12 %ig) eingelegt und anschließend gründlich mit aqua dest. gespült.

Daran schloss die Quellung des Saatgutes unter fließendem Leitungswasser an. Auf diese Weise konnte für alle Samen eine Temperaturäquivalenz erreicht und die Sauerstoffzufuhr gewährleistet werden. Zudem konnte eventuell noch anhaftendes Natriumhypochlorit durch das fließende Wasser vom Saatgut entfernt werden.

### 3.1.4 Dauer einer Messreihe

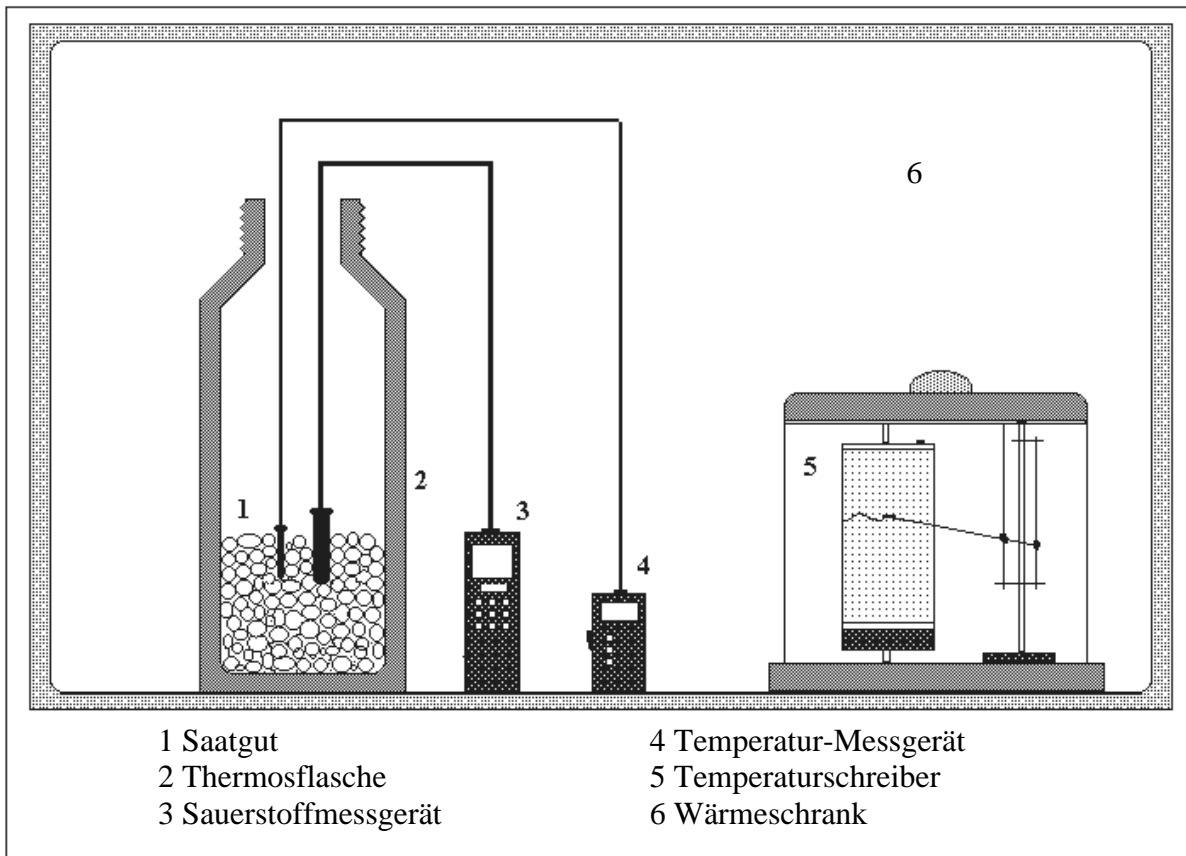
Um die Messungen zum Zeitpunkt einsetzender Keimung beginnen zu können, wurde während des Quellvorganges der Austritt der Radicula bei 50 % der Samen als geeignetes Zeichen für beginnende Keimung betrachtet (vgl. MOHR & SCHOPFER, 1978, 434) – erst dann wurde die Vorquellung abgebrochen. Unter diesen Versuchsbedingungen ergaben sich für *Pisum sativum* eine Quelldauer von 48 Stunden, für *Zea mays saccharata* und *Vigna radiata* jeweils 55 Stunden.

Nach eingehenden Voruntersuchungen wurde die Messzeit der Wärmeentwicklung bei der Keimung auf jeweils 14 Stunden festgelegt. Eine größere

Zeitspanne erwies sich als ungünstig, da nach einem Zeitraum von 14 Stunden der Sauerstoffgehalt im Bereich des Saatgutes in der Thermosflasche (Isoliergefäß) bereits um 50 % abgenommen hatte.

### 3.2 Durchführung

Ausgehend von der Frage nach der „Nettowärmeentwicklung“ bei der Keimung, wurden nicht nur Messreihen mit desinfiziertem Saatgut (*Pisum sativum* [Saatgut der Firma Carl Sperling GmbH & Co., Lüneburg], *Zea mays saccharata* und *Vigna radiata*), sondern auch Messreihen ohne vorherige Desinfektion der entsprechenden Samenarten durchgeführt, bei denen potentiell Mikroorganismen mitgezüchtet werden konnten. Alle übrigen Variablen wurden dabei jeweils gleich gehalten.



**Abb. 1:** Schematische Darstellung der Versuchsanordnung.

Es wurden jeweils 40 g Saatgut (Trockengewicht) desinfiziert und gequollen (s. o.); anschließend abgossen, gewogen, in ein Isoliergefäß gefüllt und wie beschrieben im Wärmeschrank bei 20 °C Starttemperatur aufgebaut (Abb. 1). Eine Messreihe wurde jeweils nach 14 Stunden beendet.

Zum Vergleich wurde zusätzlich eine Messreihe nach Anleitung von KUHN & PROBST (1983, 334) durchgeführt. Dazu wurden 200 g (nicht desinfizierte)

gequollene *Pisum sativum* auf feuchte Filterpapierschnipsel in das Isoliergefäß gefüllt und dieses mit Watte verschlossen. Die Messungen der Werte wurden analog zu denen der anderen Messreihen durchgeführt, allerdings über einen Zeitraum von 96 Stunden.

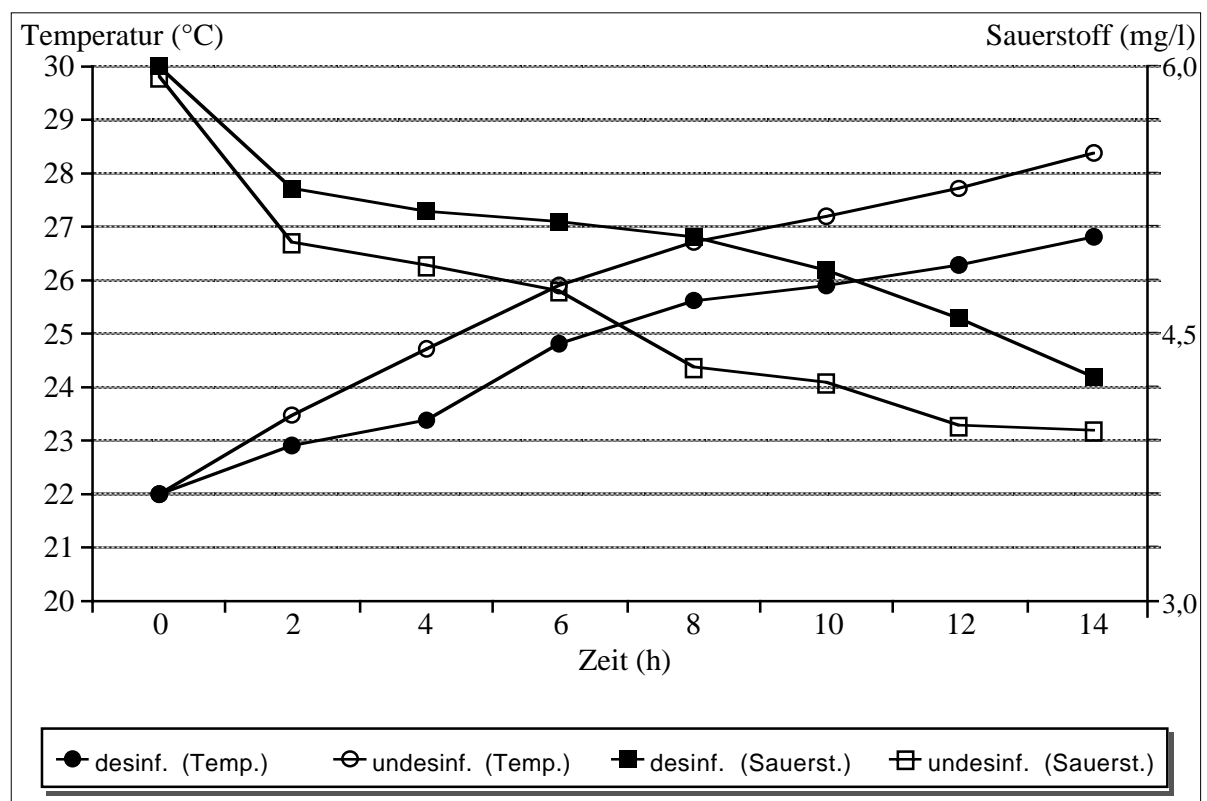
Alle Messreihen wurden fünfmal wiederholt und bei der Ergebnisdarstellung ist das arithmetische Mittel der Messwerte angegeben.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Temperatur- und Sauerstoffwerte

#### 4.1.1 Keimung von Erbsen

Bei den nicht desinfizierten Samen von *Pisum sativum* wurde zwei Stunden nach dem Start – beginnend bei 22 °C – ein Temperaturanstieg von 1,5 °C gemessen (Abb. 2). Bei den mit Natriumhypochlorit behandelten Samen stieg die Temperatur um 0,9 °C an.



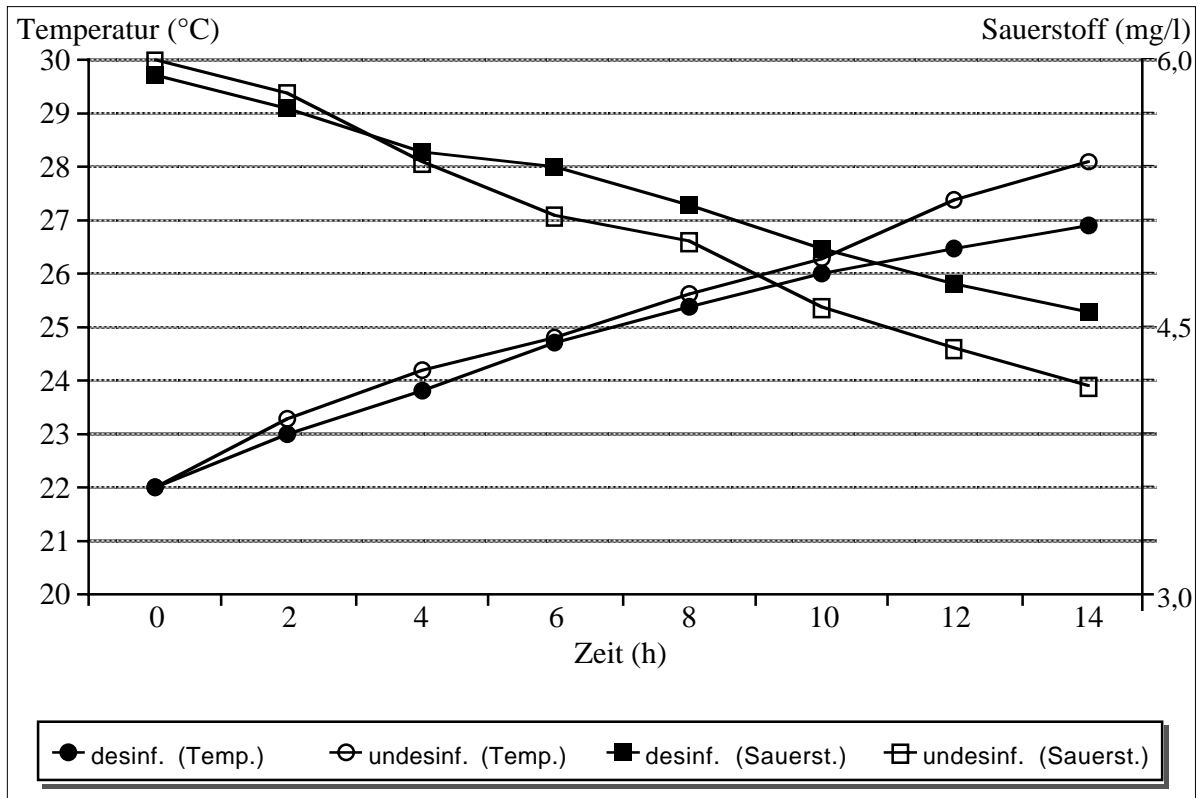
**Abb. 2:** Temperaturzunahme und absolute Sauerstoffabnahme bei der Keimung von 40 g *Pisum sativum* (Trockengewicht).

Nach 14 Stunden betrug die Temperaturerhöhung der desinfizierten Samen 4,8 °C, die der nicht desinfizierten Samen lag um einen Wert von 1,6 °C höher.

Der Sauerstoffgehalt nahm bei den desinfizierten Samen um 1,73 mg/l von anfänglich 6 mg/l auf 4,27 mg/l ab. Bei den nicht desinfizierten Samen nahm der Sauerstoffgehalt um 1,95 mg/l von 5,92 mg/l auf 3,97 mg/l ab (vgl. Tab. 2).

#### 4.1.2 Keimung von Mungobohnen

Bei den nicht desinfizierten Samen wurde nach zwei Stunden ein Temperaturanstieg von 1,3 °C festgestellt (Abb. 3). Die Temperaturerhöhung der desinfizierten Samen betrug innerhalb derselben Zeit 1,0 °C.



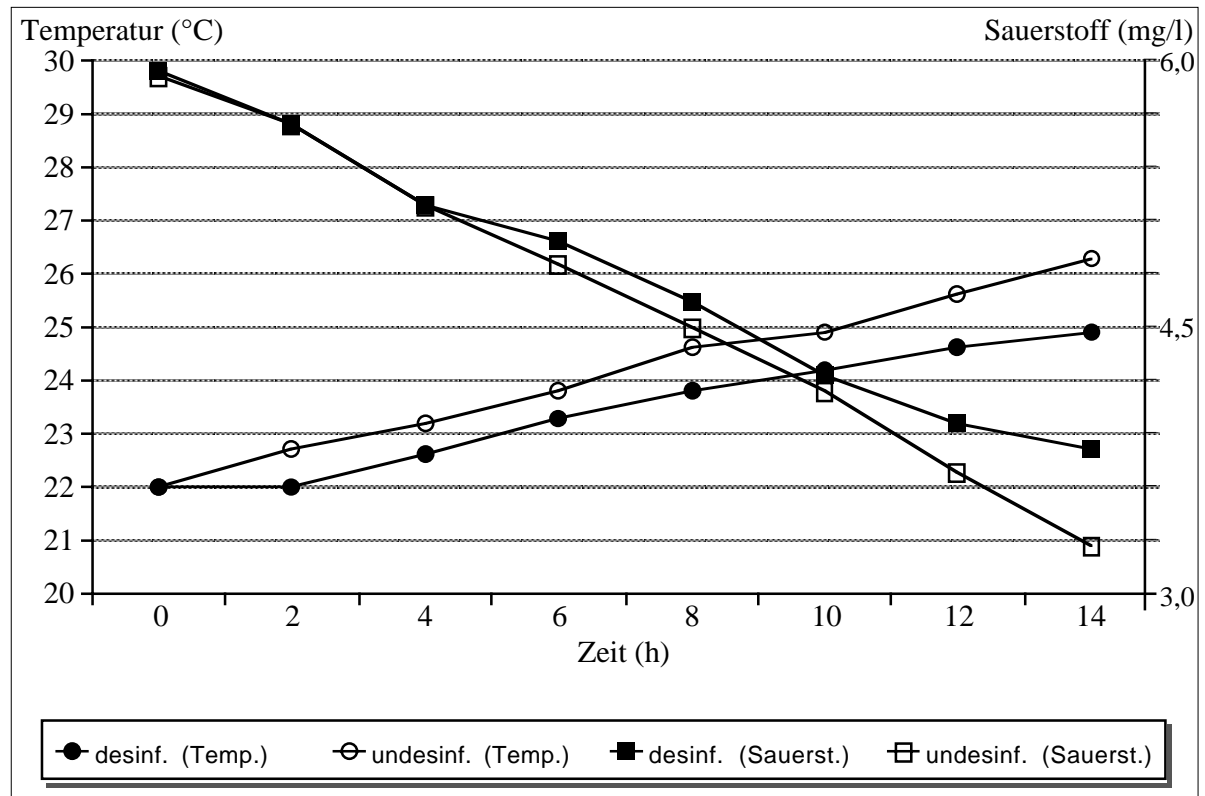
**Abb. 3:** Temperaturzunahme und absolute Sauerstoffabnahme bei der Keimung von 40 g *Vigna radiata* (Trockengewicht).

Die letzte Messung nach 14 Stunden zeigte, dass die Temperatur der desinfizierten Samen insgesamt um 4,9 °C angestiegen war, die der nicht desinfizierten Samen um 6,1 °C. Der Sauerstoffgehalt in dem mit unbehandelten Samen von *Vigna radiata* gefüllten Isoliergefäß ist innerhalb von 14 Stunden durchschnittlich von 6,00 mg/l auf 4,18 mg/l gesunken. Die mit Natriumhypochlorit behandelten Samen hatten zu Beginn einem Sauerstoffgehalt von durchschnittlich 5,91 mg/l, nach 14 Stunden wurde ein Wert von durchschnittlich 4,60 mg/l gemessen (vgl. Tab. 2).



### 4.1.3 Keimung von Mais

Auch hierbei zeichneten sich nach zwei Stunden erste Differenzen zu den Ausgangswerten ab. Die Temperaturwerte der nicht desinfizierten Samen stiegen in dieser Zeitspanne um  $0,7\text{ °C}$  an, die der desinfizierten Samen hingegen blieben gleich ihrem Anfangswert (Abb. 4).



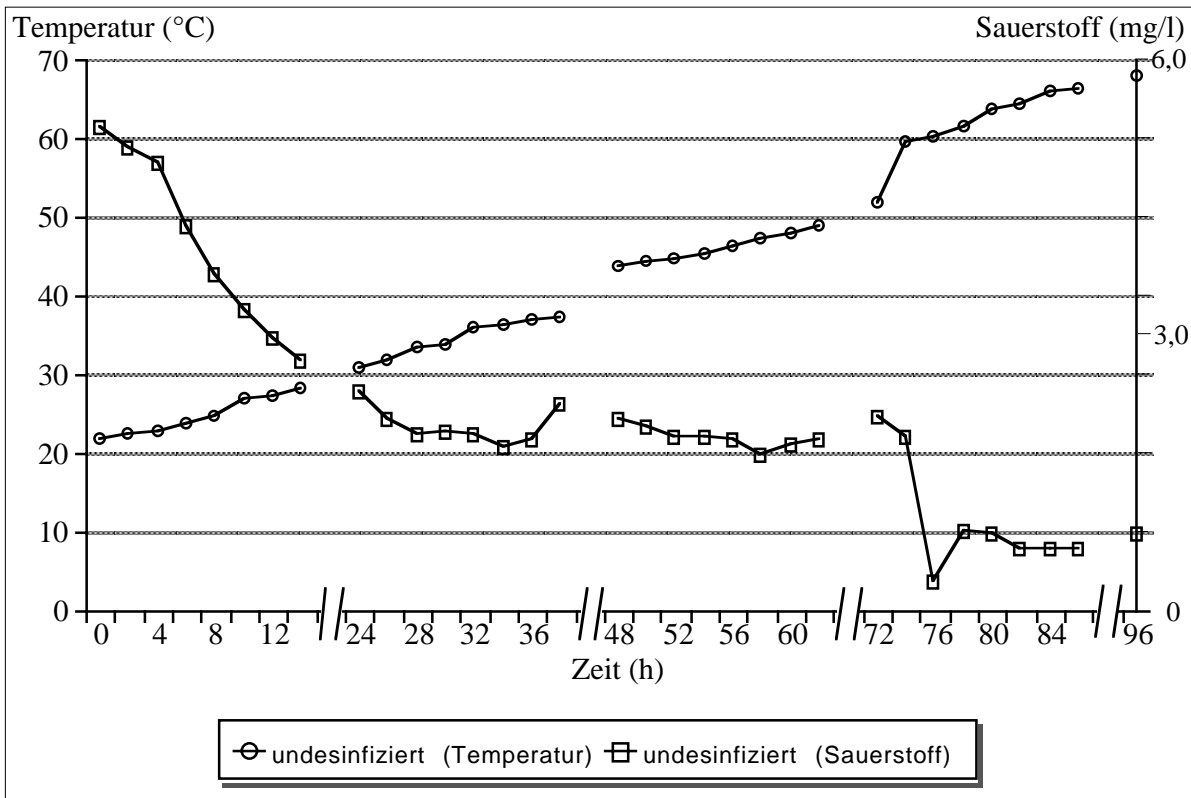
**Abb. 4:** Temperaturzunahme und absolute Sauerstoffabnahme bei der Keimung von 40 g *Zea mays saccharata* (Trockengewicht).

Nach 14 Stunden betrug die Temperaturerhöhung gegenüber dem Messbeginn bei den desinfizierten Samen  $2,9\text{ °C}$ , die Temperaturerhöhung der nicht desinfizierten Samen betrug durchschnittlich  $4,3\text{ °C}$ . Der Sauerstoffgehalt nahm bei den desinfizierten Samen von *Zea mays saccharata* im Laufe von 14 Stunden durchschnittlich von  $5,93\text{ mg/l}$  auf  $3,81\text{ mg/l}$  ab. Bei den desinfizierten Samen nahm der Sauerstoffgehalt in 14 Stunden dagegen lediglich um durchschnittlich  $2,63\text{ mg/l}$  ab (Abb. 4).

## 4.2 Temperatur- und Sauerstoffwerte der Messreihen nach KUHN & PROBST

Bis zu der zweiten Messstunde stieg die Temperatur im Bereich der keimenden Samen auf  $22,6\text{ °C}$  und nach 14 Stunden auf  $28,6\text{ °C}$  an. Nach 96 Stunden betrug die Temperatur in dem Isoliergefäß  $68\text{ °C}$  (Abb. 5). Dieses entsprach einem Temperaturzuwachs von  $46\text{ °C}$  seit Beginn des Messbeginns.

Der Sauerstoffgehalt in dem Isoliergefäß betrug zu Beginn 5,26 mg/l. Nach 14 Stunden sank der Wert auf 2,71 mg/l, was einer Sauerstoffabnahme um 48 % innerhalb der ersten 14 Stunden entspricht (vgl. Tab. 2). Bei Ende der Messreihe nach 96 Stunden betrug der Sauerstoffgehalt nur noch 0,89 mg/l. Der Sauerstoffgehalt hat demnach im Verlauf der gesamten Messreihe um 83 % abgenommen.



**Abb. 5:** Temperaturzunahme und absolute Sauerstoffabnahme bei der Keimung von 200 g *Pisum sativum* (Quellgewicht) nach Anleitung von KUHN & PROBST (1983, 334). [Unterbrechung der Temperatur- und Sauerstoffkurve = Messpause von 10 Stunden].

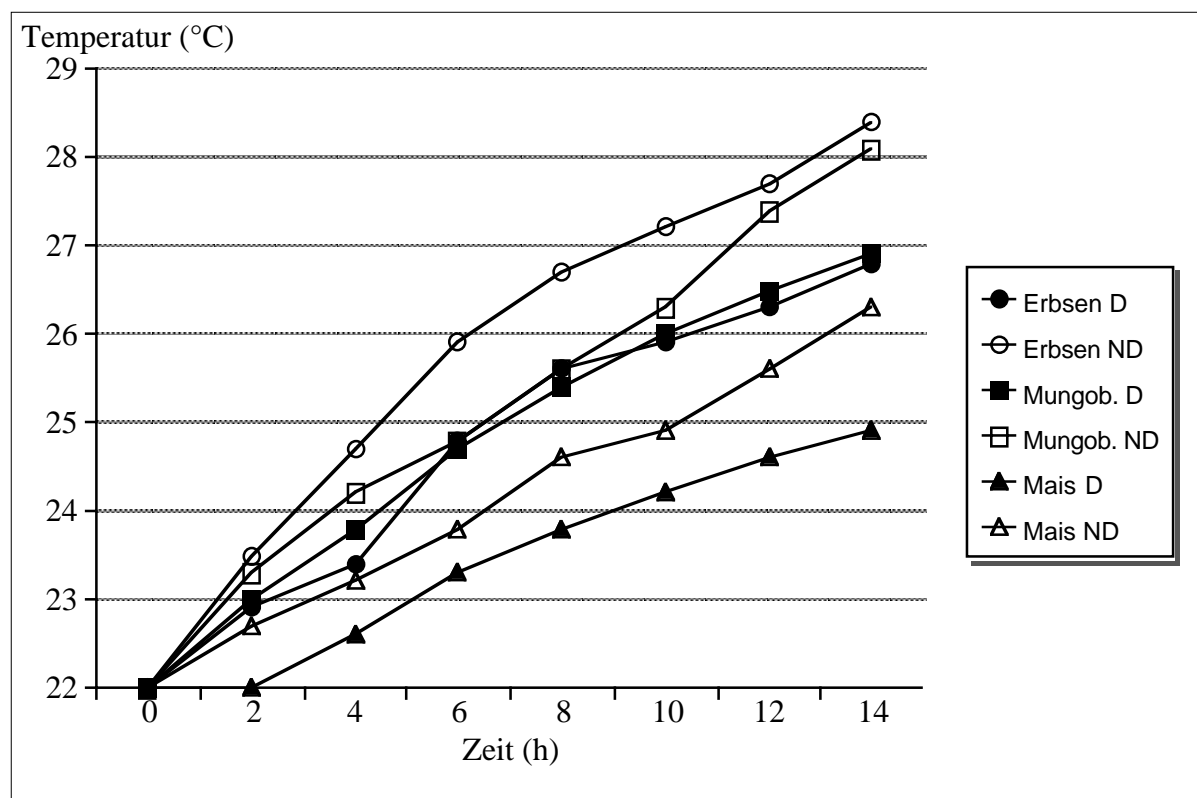
## 5 Auswertung und Diskussion

### 5.1 Temperaturwerte bei der Keimung von *Pisum sativum*, *Zea mays saccharata* und *Vigna radiata*

Um die Temperaturerhöhungen des Saatgutes der verschiedenen Pflanzenarten besser vergleichen zu können, sind die Ergebnisse der Temperaturwerte von den Abb. 2-4 in einer Übersicht zusammengefasst (Abb. 6).

Der Ausgangstemperatur betrug bei allen Samenarten 22 °C. Über die Aufzeichnungen des Temperaturschreibers in dem Wärmeschrank ließ sich gut kontrollieren, dass die Temperatur des Wärmeschrankes stets mindestens 2 °C unterhalb der zuletzt gemessenen Temperatur in dem Isoliergefäß lag. Die kei-

menden Samen wurden also nicht artifiziell erwärmt. Anhand der Temperaturverläufe in Abbildung 6 wird ein Unterschied zwischen desinfizierten und nicht desinfizierten Samen der unterschiedlichen Pflanzenarten deutlich. Das Saatgut ohne Vorbehandlung mit der NaOCl-Lösung erreichte bei jeder Messreihe einen höheren Temperaturwert als das gleiche Saatgut mit desinfizierender Vorbehandlung. Auch wenn bedacht wird, dass die desinfizierten Samen möglicherweise doch nicht hundertprozentig frei von Mikroorganismen waren, so konnte doch nach 14 Stunden Keimung ein definitiver Unterschied zwischen desinfiziertem und nicht desinfiziertem Saatgut ausgemacht werden: 1,6 °C bei *Pisum sativum*, 1,4 °C bei *Zea mays saccharata* und 1,2 °C bei *Vigna radiata*. Da es nach entsprechenden Experimenten keinen Unterschied im Keimungsverlauf zwischen dem desinfiziertem und dem nicht desinfiziertem Saatgut gibt, kann davon ausgegangen werden, dass bei der Wärmeentwicklung in dem Experiment mit desinfiziertem Saatgut von einer „Nettowärmeentwicklung“ entsprechend obiger Definition gesprochen werden kann.



**Abb. 6:** Temperaturzunahme von je 40 g keimenden Erbsen, Mungobohnen und Mais (Trockengewicht) [D = desinfiziert; ND = nicht desinfiziert].

KUHN & PROBST (1983, 334) erkannten, dass Mikroorganismen Einfluss auf die Wärmeentwicklung nehmen können. Es bleibt jedoch dem Leser überlassen, wie hoch der Anteil der Mikroorganismen an der Wärmeentwicklung bei der Keimung ist. Mit den vorgestellten Messreihen konnte immerhin festge-

stellt werden, dass schon zu Beginn der Keimung ein deutlich messbarer Anteil der Wärmeentwicklung auf mikrobielle Stoffwechselaktivität zurückgeführt werden kann.

Ein möglicher Grund dafür, dass die Temperaturdifferenzen der desinfizierten Samen einerseits und nicht desinfizierten Samen andererseits bei den drei Samenarten nicht einheitlich verliefen, ist die unterschiedliche Beschaffenheit der Oberfläche einzelner Arten. Möglicherweise stellen die Faltungen der Oberfläche von *Pisum sativum* einen bevorzugten Aufenthaltsort für Mikroorganismen dar. Bei der Keimung von nicht desinfizierten Samen in dem Isoliergefäß konnten demnach entsprechend mehr Bakterien und Pilze auf *Pisum sativum* als auf nicht desinfiziertem *Zea mays saccharata* oder *Vigna radiata*, die weniger Relief auf ihrer Oberfläche aufweisen, stoffwechselaktiv sein. Es ist daher möglich, dass die angesprochenen unterschiedlichen Differenzen die Stoffwechselwärme der Mikroorganismen anzeigten. Dieses Ergebnis zeigt gerade bei *Pisum sativum* deutlich, dass die Behandlung mit der NaOCl-Lösung erfolgreich verlief, da die Kurvenverläufe divergieren. So zeigen sich bei *Vigna radiata* von den verwendeten Samenarten die geringsten Oberflächenunebenheiten. Das kann eine relativ geringe Differenz zwischen desinfizierten und nicht desinfizierten Samen dieser Pflanzenart erklären.

Auffällig ist (s. Abb. 6), dass beide Leguminosenarten im Vergleich zu *Zea mays saccharata* einander gleichende Temperaturverläufe aufweisen. Diese Messreihen lassen allerdings keine definitive Begründung zu.

## **5.2 Sauerstoffwerte bei der Keimung von *Pisum sativum*, *Zea mays saccharata* und *Vigna radiata***

In Abbildung 7 ist die relative Abnahme des Sauerstoffes im Verlaufe der Messreihen dargestellt. Bei sinkendem Sauerstoffwert, besteht die Möglichkeit der verringerten Atmungsaktivität. Die gemessenen Werte können neben dem Betrag der Atmungswärme der Samen noch Stoffwechselwärme der anaerob dissimilierenden Mikroorganismen enthalten.

Geht man davon aus, dass alle Inhaltsstoffe in Samen während des Keimungsablaufes zu gleichen Anteilen veratmet werden, konnte – in Kenntnis über die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe der verwendeten Samen – mit Hilfe des respiratorischen Quotienten der tendenzielle Sauerstoffverbrauch von *Pisum sativum*, *Zea mays saccharata* und *Vigna radiata* gegenübergestellt werden. Der respiratorische Quotient stellt das Verhältnis von abgegebenem Kohlenstoffdioxid und aufgenommenem Sauerstoff bei der Atmung dar ( $\text{CO}_2/\text{O}_2$ ). Bei der Veratmung von Kohlenhydraten wird weniger Sauerstoff be-

nötigt als bei Fetten und Proteinen, da Kohlenhydratmoleküle relativ sauerstoffreich sind. Der respiratorische Quotient beträgt 1,0. Fette haben weniger Sauerstoff im Molekül, sodass mehr Sauerstoff bei dem oxidativen Abbau benötigt wird. Der respiratorische Quotient liegt bei 0,7. Proteine nehmen auf Grund ihres Sauerstoffanteils im Molekül eine Mittelstellung ein. Der respiratorische Quotient beträgt 0,85. Demnach ist der respiratorische Quotient umso höher, je weniger Sauerstoff aufgenommen werden muss und je mehr Kohlenstoffdioxid abgegeben wird.

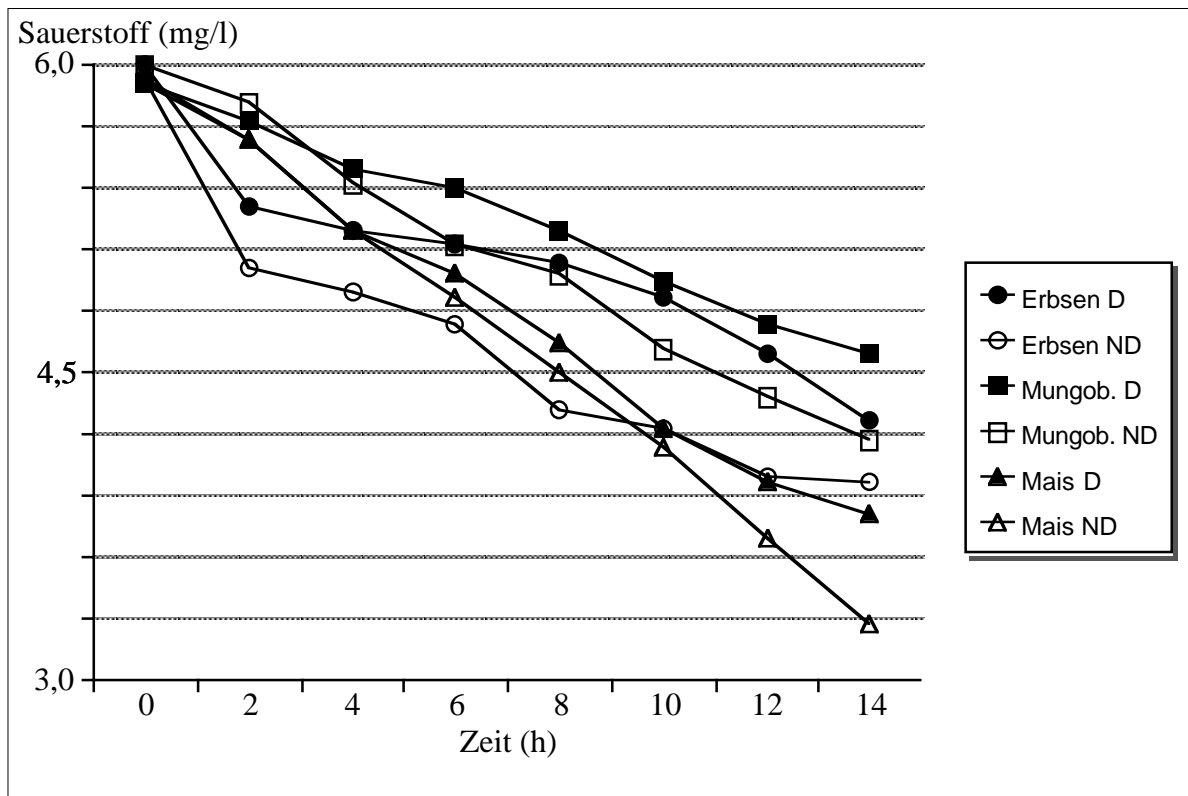
**Tab. 1:** Zusammensetzung der Inhaltsstoffe von Erbsen, Mais und Mungobohnen (modifiziert nach SIMON, 1980, 154 und FRANKE, 1985, 132).

	Proteine	Fette	Kohlenhydrate
<b>Erbsen</b>	22,9 %	1,4 %	60,7 %
<b>Mais</b>	9,2 %	3,8 %	71,0 %
<b>Mungobohnen</b>	24,5 %	1,2 %	59,7 %

Um den Sauerstoffverbrauch einer Samenart bei der Atmung in Verhältnis zu dem Sauerstoffverbrauch der anderen Samenarten setzen zu können, wurde je Samenart der sauerstoffreichste Inhaltsstoff in Verhältnis zu dem Inhaltsstoff mit dem geringsten Anteil an Sauerstoff im Molekül gesetzt (Kohlenhydrate/Fette). Proteine wurden wegen ihrer Mittelstellung im Verhältnis Kohlenstoffdioxid zu Sauerstoff bei der Rechnung nicht berücksichtigt. Somit ergab das Verhältnis Kohlenhydrate/Fette einen neuen Quotienten von 43,4 bei Erbsen, einen Quotienten von 49,9 bei Mungobohnen und einen Quotienten von 18,7 bei Mais. Anhand dieser Werte lässt sich zwar nicht der absolute Sauerstoffverbrauch einzelner Samenarten feststellen, aber, ob bei einer Samenart relativ mehr Sauerstoff bei dem oxidativen Abbau der Inhaltsstoffe verbraucht wird als bei einer anderen Samenart.

Wenn tatsächlich alle Stoffe in gleichen Mengen veratmet werden sollten, hätte *Zea mays saccharata* den höchsten Sauerstoffverbrauch, *Vigna radiata* den geringsten und *Pisum sativum* hätte einen Sauerstoffverbrauch knapp über dem von *Vigna radiata*. Die Daten in Abbildung 7 stimmen mit der Annahme überein.

Der Vergleich der relativen Abnahme des Sauerstoffgehaltes in Abbildung 7 mit der Temperaturerhöhung in Abbildung 6 verdeutlicht, dass bei *Vigna radiata* und *Pisum sativum* die Sauerstoffabnahme umgekehrt proportional zu der Temperaturzunahme ist. Bei *Zea mays saccharata* ist sowohl bei den desinfizierten als auch bei den nicht desinfizierten Samen keine Proportionalität zwischen Temperaturzunahme und Sauerstoffabnahme zu erkennen (Tab. 2).



**Abb. 7:** Relative Sauerstoffabnahme von je 40 g keimenden *Pisum sativum*, *Vigna radiata* und *Zea mays saccharata* (Trockengewicht) [D = desinfiziert; ND = nicht desinfiziert].

### 5.3 Temperatur und Sauerstoffwerte der Messreihen nach KUHN & PROBST

In Abbildung 5 lassen sich deutliche Tendenzen bezüglich der Kurvenverläufe feststellen. Die Temperaturkurve gleicht einer Geraden. Die Sauerstoffkurve gleicht einer Sättigungskurve. Es wird deutlich, dass sich die Werte ab 78 Stunden auf einen konstanten Wert einpendeln. Anhand des Sauerstoffverbrauches und der Temperaturzunahme dieser Messreihe wird deutlich, dass die

**Tab. 2:** Relative Temperaturzunahme und relative Sauerstoffabgabe von jeweils 40 g *Pisum sativum*, *Vigna radiata* und *Zea mays saccharata* (Trockengewicht) nach 14 Stunden.

Werte	<i>Pisum sativum</i>		<i>Vigna radiata</i>		<i>Zea mays saccharata</i>		<i>Pisum sativum</i> <sup>3</sup>
	D <sup>1</sup>	ND <sup>2</sup>	D <sup>1</sup>	ND <sup>2</sup>	D <sup>1</sup>	ND <sup>2</sup>	ND <sup>2</sup>
<b>Temperaturzunahme</b>	22 %	29 %	22 %	28 %	13 %	20 %	30 % (209 %)⁴
<b>Sauerstoffabnahme</b>	29 %	33 %	22 %	30 %	36 %	45 %	48 % (83 %)⁴

<sup>1</sup> desinfiziert.

<sup>2</sup> nicht desinfiziert.

<sup>3</sup> 200 g *Pisum sativum* (Quellgewicht), behandelt nach Versuchsanleitung von Kuhn & Probst (1983, 334).

<sup>4</sup> Werte nach 96 Stunden.

Wärmeentwicklung bei der Atmung der keimenden Samen zu Lasten des Gasaustausches isoliert wurde.

Bei den Versuchsreihen ohne Sauerstoffabschluss wurde eine geringere Temperaturzunahme, aber auch eine geringere Sauerstoffabnahme gemessen. Das lag mitunter an der Tatsache, dass bei diesen Messreihen nur halb so viel Saatgut wie nach Anleitung von KUHN & PROBST (1983, 334) verwendet wurde. Denn lufttrockene Gerstenkörner z. B. geben pro kg in 24 Stunden 0,35 mg CO<sub>2</sub> ab. Nach Quellbeginn geben sie unter gleichen Bedingungen bei 33 % Wassergehalt 2000 mg pro kg und Tag ab (ESCHENHAGEN, 1986). Durch die geringere Sauerstoffabnahme der neu entwickelten Messreihen gegenüber den Messreihen nach KUHN & PROBST (1983, 334) wurde bestätigt, dass die Verwendung von einer geringeren Saatgutmenge und der Verzicht auf Vollisolierung den Gasaustausch verstärkt zuließ. Die Darstellung in Tabelle 2 zeigt, dass nach Anleitung von KUHN & PROBST (1983, 334) sonst fast 50 % Sauerstoffabnahme in den ersten 14 Stunden erfolgte.

Zu diesem Zeitpunkt hätte demnach bereits anaerobe Dissimilation stattfinden müssen. Es ist also nicht korrekt, dass KUHN & PROBST (1983, 334) in ihrer Darstellung der Versuchsergebnisse die Temperaturerhöhung als „Temperatur der Erbsen“ benennen. Wenn nun über 50 % Sauerstoffabnahme als anaerobe Bedingung definiert wird, so muss die Hypothese bestätigt werden, dass bei dem Versuchsaufbau von Kuhn & Probst (1983, 334) anaerobe Bedingungen schon vor dem dritten Tag auftreten. Es ist demnach anzunehmen, dass die weitere Temperaturerhöhung nicht nur durch die eingeschränkt atmenden Samen hervorgerufen wurde, sondern hauptsächlich durch anaerob dissimilierenden Mikroorganismen.

Auch eine mögliche Koagulation der Plasmaproteine wurde bei der Ergebnisdarstellung von KUHN & PROBST (1983, 334) nicht beachtet. Für in diesen Versuchsreihen verwendete Samen von *Pisum sativum* wurde ein toleriertes Temperaturmaximum von 37 °C festgestellt (siehe Kap. 3.1.1). Für die Messreihe nach Anleitung von KUHN & PROBST (1983, 334) würde das bedeuten, dass beim Überschreiten der Temperaturmaxima nach 38 Stunden keine Stoffwechselaktivität der Samen mehr stattfinden konnte. Die Samen sind zu diesem Zeitpunkt nicht mehr lebensfähig. Bei den durchgeführten Messreihen trat dieser Umstand nicht ein, da die Temperatur unterhalb der für die entsprechenden Samen festgelegten Temperaturmaxima blieb.

Um nun auf die anfangs gestellte Frage zurückzukommen, ob es Unterschiede bezüglich der Wärmeentwicklung bei der Keimung verschiedener Pflanzenarten gibt, wird noch einmal auf die Ergebnisdarstellung in Abb. 6 zu-

rückgegriffen. Saatgut unterschiedlicher Pflanzenarten zeigen demnach voneinander abweichende Temperaturentwicklungen. Die Ergebnisse der Messreihen erlauben keinen Aufschluss über die Frage, worauf diese Unterschiede begründet sind. *Pisum sativum* eignet sich nach den Ergebnissen der Messreihen, eine steigende Temperaturentwicklung bei der Keimung zu demonstrieren. Der entsprechende Kurvenverlauf ist ausgeprägter als der von *Zea mays saccharata* und *Vigna radiata*.

## Zitierte Literatur

- AICHELE, F. & E. LEHMANN (1931): Keimungsphysiologie der Gräser Gramineen. Enke, Stuttgart.
- ESCHENHAGEN, D. (1986): Samen und Früchte. UB **10** (118), 2-12.
- FRANKE, W. (1985): Nutzpflanzenkunde. Georg Thieme, Stuttgart New York.
- GESSNER, F. [Hrsg.] (1956): Die Wasseraufnahme durch Blätter und Samen. In: Handbuch der Biologie. Akadem. Verl.-Ges. Athenaion, Konstanz.
- GÖNNER, M. (1987): Temperaturwirkungen auf Lebensvorgänge der Pflanzen. (Experimente; Temperaturorgel) Magazin Experimentiervorschlag. UB **12** (122), 46-47.
- HABERLANDT, F. (1875): Der Einfluß des Quellungswassers verschiedener Temperaturen auf die Keimfähigkeit der Samen. Ibid. **2**, 47-64.
- HAFNER, L. (1980): Atmung. UB **4** (46), 2-11.
- KUHN, K. & W. PROBST (1983): Biologisches Grundpraktikum. Band 1, 4. Aufl. Fischer, Stuttgart New York.
- KRÜGER, W. (1978): Stoffwechselfysiologische Versuche mit Pflanzen. 2. Aufl. Quelle & Meyer, Heidelberg.
- MAZÉ, R. (1900): Recherches sur le rôle de l'oxygène dans la germination. Ann. Inst. Parteur **14**, 350-368 und Agr. Pr. **2**, 475.
- MOHR, H. & P. SCHOPFER (1978): Lehrbuch der Pflanzenphysiologie. 3. Aufl. Springer, Berlin Heidelberg New York.
- NIETHAMMER, A. (1926): Ein Beitrag zur Samendesinfektion. Bioch. Zs. **172**, 173-211.
- PRINGSHEIM, E.G. (1930): Untersuchungen über Samenquellung. In: Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden. Urban & Schwarzenberg, Berlin Wien.
- SCHWARZMAIER, W. (1986): Versuche zur Messung des Energieumsatzes. UB **10** (120), 51-55.
- SIMON, K.H. (1980): Nutzpflanzenzüchtung. Diesterweg & Salle. Aarau Frankfurt/Main Salzburg.
- STRYER, L. (1990): Biochemie. Spektrum, Heidelberg.
- TROLL, W. (1973): Allgemeine Botanik: Ein Lehrbuch auf vergleichend-biologischer Grundlage. 4. Aufl. Enke, Stuttgart.

**Verfasser:** Dr. Helmut Vogt, Thomas Schröder, Institut für Didaktik der Biologie, Fliegerstr. 21, 48163 Münster; [hvogtun@uni-muenster.de](mailto:hvogtun@uni-muenster.de); Judith Eschbach, Marienstr. 11, 52388 Nörvenich; [eschbach@gmx.de](mailto:eschbach@gmx.de)