



...going one step further



U1120

(Prof. Dr. Matthias Ducci/Prof. Dr. Marco Oetken)

Spread of activation on a passive iron rod – a model experiment for demonstrating continuous conduction of impulses

The following model experiments are based on the property of iron to develop a protective oxide coating in acid solutions under specific conditions. This impressive analogical model is based on the reversibility of the process of passivation and the appearance of a reactivation along a long iron rod.

Conduction of impulses along nerve fibres works on the basis of a small difference in the electrical potential of excited and non-excited areas of the cell membrane. In the *unmyelinated nerve fibres* of invertebrates, these areas are directly adjacent to each other, giving rise to the process of *continuous conduction*.

The following experiment uses a model to demonstrate continuous nerve conduction by activation of a passive iron rod.

Experiment 1: Simulation of continuous conduction along unmyelinated axons

Equipment and chemicals: Plastic basin, tweezers, measuring cylinder (100 ml), 2 measuring cylinders (50 ml), beaker (200 ml), sandpaper, iron rod, zinc electrode, hydrogen peroxide, $w(\text{H}_2\text{O}_2) = 30\%$, (corrosive, C), sulphuric acid, $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1 \text{ mol/L}$ (Titrisol), (irritant, Xi), dist. water.

Experimental procedure: A solution of water (97.5 ml), sulphuric acid (27.5 ml) and hydrogen peroxide solution (38 ml) is prepared. After degreasing and thorough treatment with the sandpaper, the iron rod is placed in the experimental vessel. The prepared solution is then poured in the vessel until the iron rod is completely immersed (height of fluid is about 3 cm). One end of the rod is then briefly touched (0.5 – 1 s) with a zinc electrode (Fig 1).

Notes:

- A paper towel should be used to hold the iron rod when using the sandpaper.
- After the experiment, the iron rod should be carefully rinsed with water, dried and treated with sandpaper. The iron rod should be stored wrapped in a paper towel. It should be greased for longer storage periods.
- After the experiment, the hydrogen peroxide and sulphuric acid solution has to be neutralised, followed by dilution with plenty of water. It can then be poured down the drain.

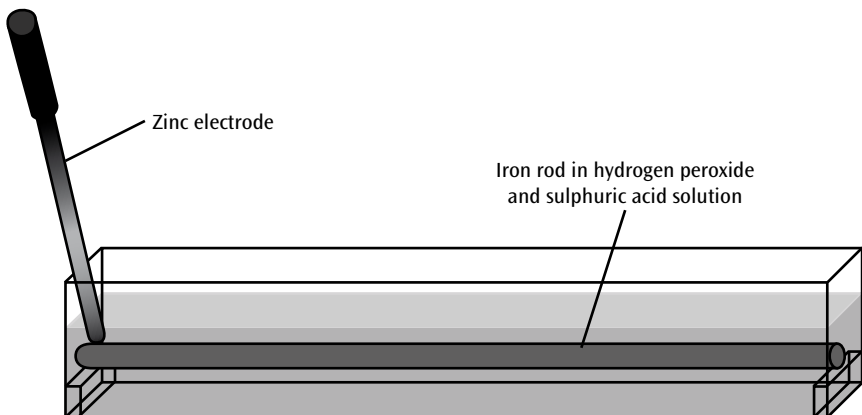


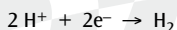
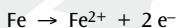
Fig 1: Experiment simulating the continuous conduction of impulses

Observation: Pronounced generation of gas at the metal surface is observed for some seconds after immersion of the iron rod in the solution. After a short time however, the iron rod looks shiny metallic and appears passive. Touching the rod with the zinc electrode then leads to gas generation at the iron, which is propagated across the entire surface of the iron rod in a wave-like manner, starting from the point of contact. Gas generation ceases just after the wave has reached the end of the rod.

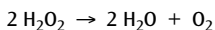
Notes:

- If the wave is not observed to travel completely across the iron rod at the first attempt of the experiment, it is recommended that the iron rod is removed and treated with sandpaper again.
- If gas generation does not stop, some more drops of hydrogen peroxide solution should be added while agitating the solution at the same time. This tends to occur if the bottle containing the hydrogen peroxide solution was not stored in the refrigerator (hydrogen peroxide decomposes at elevated temperatures), with the result that the concentration has dropped below 30% by weight. The iron rod can be removed and sanded again if necessary.
- If the iron rod remains in a passive condition, some drops of sulphuric acid should be added while simultaneously agitating the solution. The iron rod can be removed and sanded again if necessary.
- The actual concentration of a hydrogen peroxide solution often deviates by up to 2% from the concentration stated on the label, as found and demonstrated (titration) by the authors in the past.

Significance: The initial generation of gas indicates that the iron rod is in an active condition immediately after immersion, i.e. the metal dissolves accompanied by a formation of hydrogen:



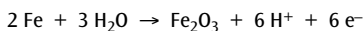
The degree of gas generation is however too high to be attributable to this process alone. Oxygen is additionally generated, as a result of the decomposition of hydrogen peroxide catalysed by Fe^{2+} .



At the same time, the oxidising action of hydrogen peroxide leads to the potential of the iron rod becoming increasingly positive.

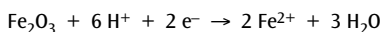
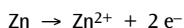


Once a specific potential (*passivation potential* E_p) is reached, the iron rod surrounds itself with an even coating of iron oxide:



The covering layer is impermeable to molecules and ions, resulting in cessation of the previously occurring processes (active dissolution of iron) as well as its own formation reaction (autoinhibition). The oxide coating therefore remains extremely thin and the metal retains its typical shine. The hydrogen peroxide decomposition reaction also stops: the metal is passivated.

Brief contact with the zinc electrode leads to a flow of electrons from the less noble zinc, which has a rest potential of about -0.62 V in this solution, to the passive iron (rest potential of about +0.6 V). The transfer of electrons causes a reduction of the iron oxide layer near the place of contact (Fig 2):



A small part of the iron rod is now in an active state again, i.e. the elemental iron formerly protected by an oxide layer now has direct contact to the electrolytes (Fig 2), while the remaining surface is still in a state of passivation.

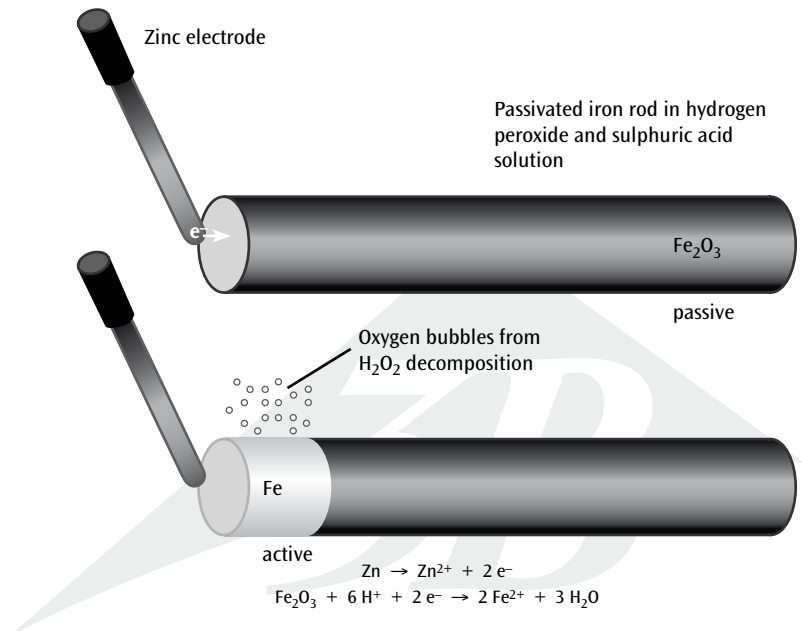
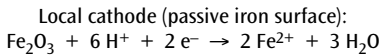
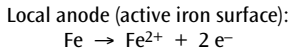


Fig 2: Processes occurring at the point of contact of zinc and passivated iron

A local element has therefore come to exist on the metal surface that now gives rise to a wave-like spread of activation: if one part of the surface is activated, the small potential difference causes local currents to flow through the neighbouring passive region, the reducing action of which reverses the passivity there (Fig 3):



Exposure of the elemental iron under the oxide layer causes the passive region to initially act as a local cathode (Fig 3, lower section). After activation the same regions acts as a local anode for new local currents to the still passive surroundings.

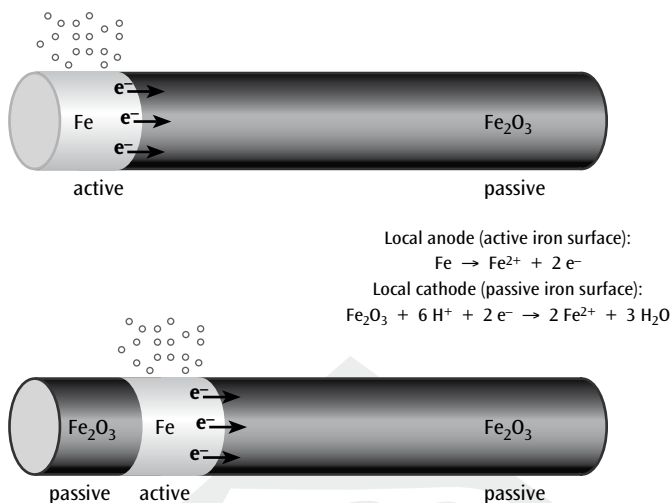


Fig 3: Propagation of the activity zone by locally occurring currents between active and passive regions of the iron rod

The migration of the potential wave can be easily followed visually, on account of the bubbles of gas rising after activation, although strictly speaking, neither the activity zone nor the action potential of the nerve migrate: instead, new generation of the electrical impulses that are transmitted in both cases takes place continuously by means of local electrical circuits along the nerve fibre or the iron rod. This process can be compared to a row of dominos, where only the first domino has to be knocked over for the falling process to be transmitted to the end of the line. The major disadvantage of this and similar models (e.g. the burning fuse model) however lies in the fact that the alteration of the starting condition cannot be reversed automatically.

In contrast, the model system presented in the experiment does have this *reversible state of change* feature: soon after commencement of gas generation, the iron rod is repassivated by the oxidising action of the hydrogen peroxide. This gives rise to a further similarity to neuronal processes, since analogous to the refractory period, reactivation of newly passivated iron at the end of the wave of activity (active and passive regions are also next to each other here) by local currents is not possible. This is probably due to the special concentration conditions at the phase border of passivated iron and electrolyte immediately after repassivation.

The increase in potential of the active iron by reduction of the hydrogen peroxide preceding passivation causes a depletion of hydrogen ions in the immediate vicinity of the iron surface, so that local currents at the end of a wave (Fig 3, lower section) cannot cause a dissolution of the previously formed oxide layer due to the low concentration of hydrogen ions. This is therefore analogous to the refractory period of the nerve.

English

A model experiment for demonstrating saltatory conduction of impulses

In contrast to unmyelinated nerve fibres, myelinated nerve fibres have myelin sheaths interrupted at specific intervals (1 to 3 mm) by *nodes of Ranvier*. Since the myelin sheath acts as an insulator, an action potential can only be triggered in the myelin-free areas. Conduction of impulses therefore takes place by jumping from one node to the other (*saltatory*), which is associated with a significantly faster rate of propagation as compared to conduction of impulses along unmyelinated nerve fibres.

In an effort to incorporate the changed structure of the myelinated axons in a model, the following experiment examines the spread of activation on a partially insulated rod of pure iron, the insulated areas intended to represent the Schwann cells and the smaller exposed areas corresponding to the nodes of Ranvier.

Experiment 2: Simulation of saltatory conduction of impulses

Equipment and chemicals: Plastic basin, tweezers, measuring cylinder (100 ml), 2 measuring cylinders (50 ml), beaker (200 ml), paper towel, sandpaper, pure iron rod, zinc electrode, plastic insulating pieces, hydrogen peroxide, $w(\text{H}_2\text{O}_2) = 30\%$, (corrosive, C), sulphuric acid, $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1 \text{ mol/L}$ (Titrisol) (irritant, Xi).

Experimental procedure: After intensive treatment with sandpaper, the iron rod is encased with plastic insulating pieces at intervals of 5 – 6 mm.

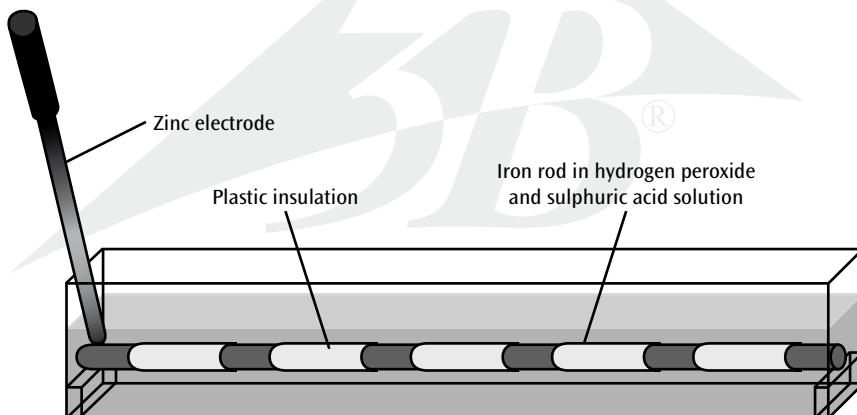


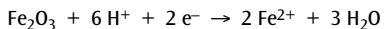
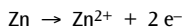
Fig 4: Experimental set-up simulating saltatory conduction of impulses

The iron rod is then immersed in the experimental vessel containing an electrolyte solution made up of water (97.5 ml), the sulphuric acid solution (27.5 ml) and the hydrogen peroxide solution (about 33 ml). If the generation of gas does not cease after some seconds, the iron rod is briefly lifted out of the electrolyte solution using the tweezers and then reimmersed. A non-insulated area at one end of the iron rod is then briefly (about 1 s) touched with a zinc electrode (Fig 4).

Observation: Once the iron rod is immersed in the solution, a generation of bubbles of gas is noticed near the non-insulated parts, which however ceases quickly. The contact with the zinc electrode triggers generation of gas again, which spreads like a wave from the place of contact of the two metals across the exposed areas of the iron surface, while no reaction is observed at the insulated parts. It is obvious that the wave reaches the end of the rod much faster than in Experiment 1. The iron rod then returns to the passive state. This effect can be demonstrated several times in a row. To ensure a successful new demonstration of the experiment every time, it is however imperative to remove the plastic pieces and re-sand the iron rod thoroughly before replacing the insulation.

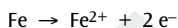
Please take into account the notes specified for Experiment 1!

Significance: Passivation of the exposed iron surface during immersion in the solution takes place according to the mechanism discussed in Expt 1. The reason for the higher speed of the potential wave lies in the mechanism of propagation: contact with the zinc electrode causes a local reduction of the iron oxide coating here as well



followed by local currents arising, that in turn lead to activation of neighbouring zones.

Local anode (active iron surface):



Local cathode (passive iron surface):

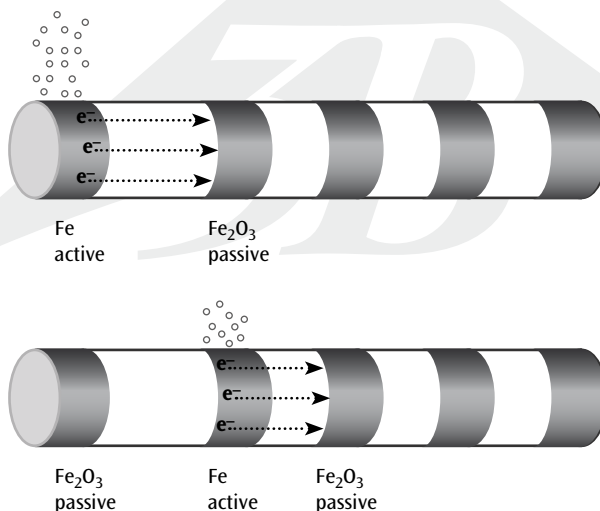
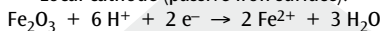


Fig 5: Mechanism of a discontinuous spread of activation

Once the activation wave reaches the first insulated area, conduction of the electrical impulse to the next exposed sector is not slowed down by a time-consuming reduction of the oxide layer, and therefore takes place at a much greater speed (Fig 5). Reduction of the coating layer and the resulting local currents then occur again within the node.

Conduction of the activation therefore takes place discontinuously from one node to the next, like the saltatory conduction of impulses.

Please remove the insulating pieces after the experiment and wash them thoroughly with water.

English

A model experiment for demonstrating synaptic conduction of impulses

Conduction of nerve signals e.g. in muscle fibres takes place via synapses representing the interface between the end of the axon and the postsynaptic membrane (motor endplate). Once an action potential reaches the synaptic cleft, a neurotransmitter is released from the presynaptic membrane, the molecules of which diffuse across the gap and have a depolarising effect on the postsynaptic membrane. When a threshold value is reached by the endplate potential of the postsynaptic membrane, a normal action potential is triggered in the vicinity of the endplate.

The following experiment does not represent a complete model of the conduction of impulses across synapses, but allows an illustrative demonstration of the principle of conduction in the presented model system.

Experiment 3: A model experiment demonstrating the transmission of information via neurotransmitters

Equipment and chemicals: As for Experiment 1. Additionally required: teat pipette, concentrated sodium chloride solution.

Experimental procedure: As for Experiment 1, except: the iron rod is not touched with a zinc electrode, but some drops of sodium chloride solution are added to the experimental vessel instead (Fig 6).

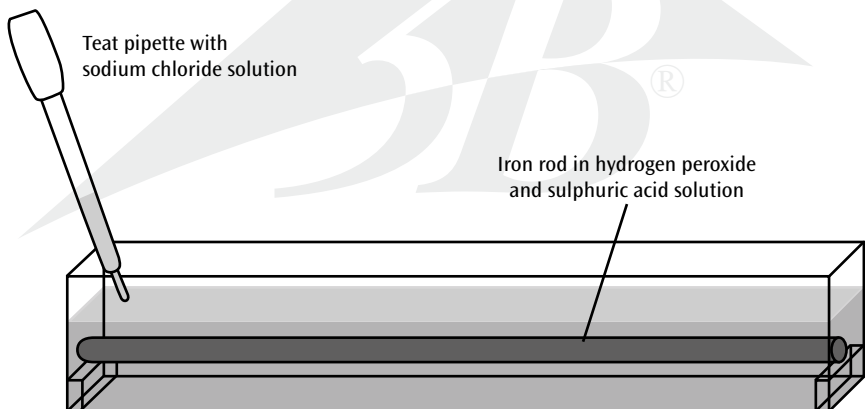
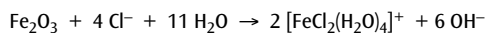


Fig 6: Experiment simulating synaptic conduction of impulses

Observation: After about 1 minute, a wave of activity starting from the end at which the sodium chloride solution was added suddenly travels across the previously shiny iron rod. The first centimetres of the iron rod remain in an active state after that, while potential waves pass across the remaining surface periodically.

Significance: The activation of the iron rod is attributable to the presence of the chloride ions. As soon as enough of these have diffused to the rod, the oxide layer is decomposed due to the following complexation:



Exposure of a part of the surface now leads to local current activity again and hence to the generation of a wave of activity.

In contrast to the neurophysiological processes at the synapse, where neurotransmitters are broken down by an enzyme after a short period of time in order to prevent continuous excitation (e.g. acetylcholine by acetylcholinesterase), the activating chloride ions are not broken down in the model experiment. The permanent presence at one end of the rod prevents complete repassivation of the iron, such as for example after brief contact with a zinc electrode, by continuously keeping this area in an active state. This continuous excitation causes potential waves to be triggered rhythmically.

Conclusion

The experimental kit presents a new electrochemical model system providing numerous analogies with neurophysiological processes involved in the generation and conduction of an impulse in real nerve fibres.

The following table provides a summary of the chief corresponding elements of axonal and model system processes:

Nerve Cell	Model
Axon membrane	Iron oxide layer on surface of iron rod
Axon interior	Elementary iron
Extracellular tissue fluid	Hydrogen peroxide and sulphuric acid solution
Resting membrane potential	Potential of the passive iron
The cell membrane of the nerve fibre is not permeable to sodium ions in a state of rest	Impermeability of iron oxide layer to ions and molecules
Depolarisation	Supply of electrons due to contact with a zinc electrode
Increase of permeability of cell membrane to sodium ions on excitation	Damage of the oxide layer by an electric or chemical disruption
Action potential	Potential change on activation
Excitation	Activation
Small potential differences between excited and non-excited areas of the cell membrane induce local currents leading to propagation of an action potential	Small potential differences at border between active and passive iron surface induce local currents leading to conduction of the zone of activity.
Excitation is followed by return to the starting condition (repolarisation)	Regeneration of oxide layer after activation due to the oxidising action of the hydrogen peroxide (repassivation)
Refractory period	No activation of newly repassivated zones by local currents
Discontinuous (saltatory) spread of excitation at myelinated nerves, associated with higher speed of conduction	Discontinuous propagation of activation along the partially insulated iron rod; fourfold increase in the of rate of propagation

Table 1: Summary of analogies between model and real system

English

Past experience with this new model system has shown that it has a highly motivating effect on students. The experiments conducted in groups always worked very well, the spread of the wave of activity being particularly impressive for the students. The students already noticed the analogy with the conduction of impulses in the nerve during the experimental phase.

A typical comment was for example: *“That’s just like the conduction of impulses in the nervous system; the threshold value is exceeded;...”*. It also emerged that the students were able to develop the mechanism of the spread of activation independently and logically on the basis of the knowledge gained in the preceding hours. The common features and differences between the model system and the neuronal processes were then considered in a fruitful discussion about the subject. The most fascinating realisation for the students was however the elegant *link between biology and chemistry* represented by this model system.



Die Aktivierungsausbreitung auf einem passiven Eisenstab – ein Modellversuch zur kontinuierlichen Erregungsleitung

Den folgenden Modellexperimenten liegt die Eigenschaft des Eisens, sich in sauren Lösungen unter bestimmten Umständen mit einer schützenden Oxidschicht zu umgeben, zugrunde. Die Reversibilität des Passivierungsvorgangs und das Erscheinungsbild der Reaktivierung entlang eines langen Eisenstabes bilden die Grundlage dieses eindrucksvollen Analogiemodells.

Die Signalleitung an Nervenfasern beruht auf einer geringen elektrischen Potenzialdifferenz zwischen erregten und unerregten Bereichen an der Zellmembran. An den *marklosen Nervenfasern* der wirbellosen Tiere grenzen diese Bereiche direkt aneinander, so dass von der *kontinuierlichen Erregungsleitung* gesprochen wird.

Im folgenden Versuch soll zunächst die kontinuierliche Nervenleitung durch die Aktivierung eines passiven Eisenstabes modellhaft dargestellt werden.

Versuch 1: Simulation der kontinuierlichen Erregungsleitung am marklosen Axon

Geräte und Chemikalien: Kunststoffwanne, Pinzette, 100-mL-Messzylinder, 2 50-mL-Messzylinder, 200-mL-Becherglas, Schmirgelpapier, Eisenstab, Zinkelektrode, Wasserstoffperoxid, $w(\text{H}_2\text{O}_2) = 30\%$, (ätzend, C), Schwefelsäure, $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1 \text{ mol/L}$ (Titrisol), (reizend, Xi), dest. Wasser.

Versuchsdurchführung: Zunächst wird eine Lösung aus 97,5 mL Wasser, 27,5 mL der Schwefelsäure-Lösung und 38 mL der Wasserstoffperoxid-Lösung hergestellt. Der entfettete und gut geschmirgelte Eisenstab wird in das Versuchsgefäß hinein gelegt und so viel von der hergestellten Lösung hinzu gegeben, bis der Eisenstab vollständig eintaucht (Flüssigkeitshöhe ca. 3 cm). Nun berührt man ihn an einem Ende kurzzeitig (0,5-1 s) mit der Zinkelektrode (Abb. 1).

Hinweise:

- Der Eisenstab sollte beim Schmirgeln mit einem Papiertuch angefasst werden.
- Nach dem Versuch sollte der Eisenstab sorgfältig mit Wasser abgespült, getrocknet und geschmirgelt werden. Für die Aufbewahrung eignet sich das Einwickeln in ein Papiertuch. Bei längerer Aufbewahrung Eisenstab wieder einfetten.
- Die schwefelsaure Wasserstoffperoxid-Lösung muss nach dem Versuch neutralisiert und kann dann stark verdünnt mit Wasser in den Ausguss gegeben werden.

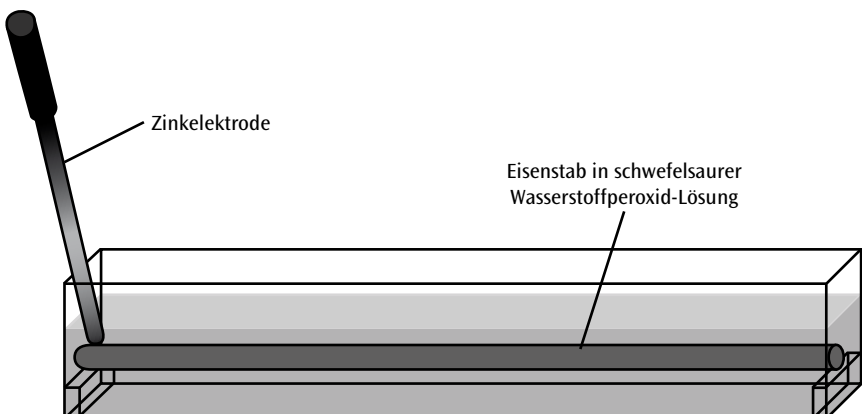


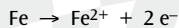
Abb. 1: Versuch zur Simulation der kontinuierlichen Erregungsleitung

Beobachtung: Beim Eintauchen des Eisenstabes in die Lösung ist an der Metalloberfläche für einige Sekunden eine starke Gasentwicklung zu erkennen. Doch schon nach wenigen Augenblicken liegt das Eisen trotz des sauren Mediums scheinbar unangreifbar und metallisch blank vor. Die Berührung mit der Zink-elektrode führt dann zu einer Gasentwicklung am Eisen, die sich - ausgehend vom Kontaktpunkt - wellenartig über die gesamte Oberfläche des Eisenstabes fortpflanzt. Kurz nachdem die Welle das Stabende erreicht hat, hört die Gasentwicklung wieder auf.

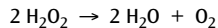
Hinweise:

- Falls beim ersten Versuchsdurchgang die Welle nicht vollständig über den Eisenstab laufen sollte, empfiehlt es sich, den Eisenstab herauszunehmen und erneut abzuschmirgeln.
- Sollte die Gasentwicklung nicht aufhören, muss bei gleichzeitiger Bewegung der Lösung tropfenweise weitere Wasserstoffperoxid-Lösung zugefügt werden. Dieser Fall tritt vor allem dann auf, wenn die Vorratsflasche der Wasserstoffperoxid-Lösung nicht im Kühlschrank aufbewahrt wurde (Wasserstoffperoxid zersetzt sich in der Wärme) und infolgedessen die Konzentration unter 30 Gew.-% abgesunken ist. Gegebenenfalls Eisenstab herausnehmen und erneut schmirgeln.
- Sollte der Eisenstab im passiven Zustand verbleiben, gibt man unter gleichzeitiger Bewegung der Lösung einige Tropfen Schwefelsäure hinzu. Gegebenenfalls Eisenstab herausnehmen und erneut schmirgeln.
- Nicht selten weichen die tatsächlichen Konzentrationen von Wasserstoffperoxid-Lösungen nach Erfahrung der Autoren nachweislich (Titration) um bis zu 2 % von den Angaben auf dem Etikett ab.

Deutung: Die anfängliche Gasentwicklung weist darauf hin, dass sich der Eisenstab direkt nach dem Eintauchen im aktiven Zustand befindet, d. h. das Metall löst sich unter Wasserstoffentwicklung auf:



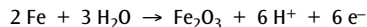
Die Gasentwicklung ist jedoch von solcher Heftigkeit, dass sie nicht allein auf diesen Prozess zurückzuführen ist. Vielmehr kommt es außerdem zur Entwicklung von Sauerstoff, der durch den Fe^{2+} -katalysierten Zerfall des Wasserstoffperoxids an der Eisenoberfläche entsteht:



Gleichzeitig führt die oxidierende Wirkung des Wasserstoffperoxids dazu, dass das Potenzial des Eisenstabes zunehmend positiviert wird:

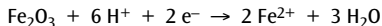
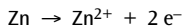


Erreicht es ein bestimmtes Potenzial (*Passivierungspotenzial* E_p), umgibt sich der Eisenstab mit einer gleichmäßig deckenden Eisenoxidschicht:



Durch die Undurchlässigkeit für Moleküle und Ionen bewirkt die Deckschicht, dass die bisher ablaufenden Prozesse (aktive Eisenauflösung), aber auch ihre eigene Bildungsreaktion unterbunden werden (Autoinhibition). Daher bleibt die Oxidschicht äußerst dünn, und das Metall behält seinen typischen Glanz. Die Zerfallsreaktion des Wasserstoffperoxids kommt ebenfalls zum Erliegen: Das Metall ist passiviert.

Die kurze Berührung mit der Zinkelektrode führt dazu, dass Elektronen vom unedleren Zink, dessen Ruhepotenzial in dieser Lösung bei ca. -0,62 V liegt, zum passiven Eisen (Ruhepotenzial ca. +0,6 V) fließen. Die Elektronenübertragung bewirkt eine Reduktion der Eisenoxidschicht im Bereich der Kontaktstelle (Abb. 2):



Es tritt nun der Fall ein, dass sich ein kleiner Teil des Eisenstabes wieder im aktiven Zustand befindet, d. h. das zuvor von der Oxidschicht geschützte elementare Eisen steht in diesem Bereich in direktem Kontakt mit dem Elektrolyten (Abb. 2), während die restliche Oberfläche noch passiviert vorliegt.

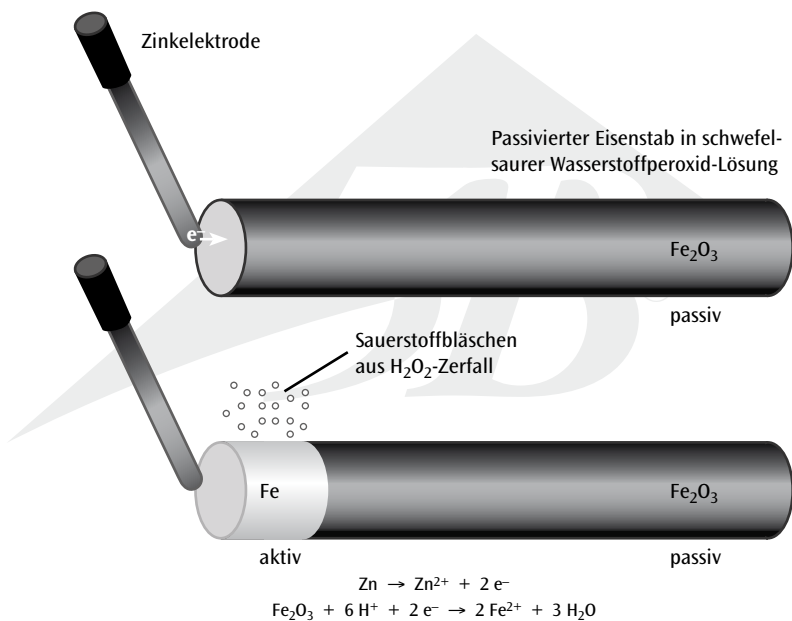
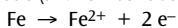


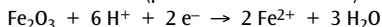
Abb. 2: Vorgänge an der Kontaktstelle Zink/passiviertes Eisen

Auf der Metalloberfläche ist demnach ein Lokalelement entstanden, das nun die wellenartige Aktivierungsbreitung bewirkt: Ist nämlich ein Teil der Oberfläche aktiviert, so wird aufgrund der geringen Potenzialdifferenz der angrenzende passive Bereich von Lokalströmen durchflossen, deren reduzierende Wirkung die Passivität an dieser Stelle aufhebt (Abb. 3):

Lokalanode (aktive Eisenoberfläche):



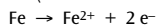
Lokalkathode (passive Eisenoberfläche):



Durch die Freilegung des elementaren Eisens unter der Oxidschicht wird die zunächst als Lokalkathode wirkende passive Fläche (Abb. 3, unterer Teil) nach eingetretener Aktivierung zur Lokalanode erneuter Lokalströme für die noch passive Umgebung.



Lokalanode (aktive Eisenoberfläche):



Lokalkathode (passive Eisenoberfläche):

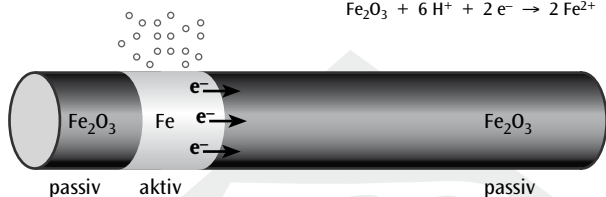
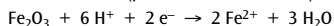


Abb. 3: Fortpflanzung der Aktivitätszone durch auftretende Lokalströme zwischen aktiven und passiven Bereichen auf dem Eisenstab

Die Wanderung der Potenzialwelle kann angesichts aufsteigender Gasbläschen nach eingetretener Aktivierung optisch gut verfolgt werden, wobei sowohl die Aktivitätszone als auch das Aktionspotenzial am Nerven genau genommen nicht wandern: Vielmehr werden in beiden Fällen die elektrischen Impulse, die übertragen werden, durch lokale Stromkreise entlang der Nervenfasern bzw. des Eisenstabes fortlaufend neu generiert. Man kann diesen Vorgang auch mit einer Reihe Dominosteine vergleichen, bei der ebenfalls nur der erste Stein umgestoßen werden muss, um sein Fallen bis zum Ende der Reihe zu übermitteln. Der große Nachteil dieses und ähnlicher Modelle (z.B. Zündschnurmodell) liegt jedoch darin, dass die Veränderung des Grundzustandes nicht selbsttätig umkehrbar ist.

Die Eigenschaft der *reversiblen Zustandsänderung* zeigt demgegenüber das im Versuch vorgestellte Modellsystem: Kurz nach dem Einsetzen der Gasentwicklung wird der Eisenstab durch die oxidierende Wirkung des Wasserstoffperoxids repassiviert. Daraus ergibt sich eine weitere Gemeinsamkeit zu den Vorgängen am Nerven, da analog der Refraktärzeit die Reaktivierung von frisch passiviertem Eisen am Ende der Aktivitätswelle (hier liegen aktiver und passiver Bereich auch nebeneinander vor) durch Lokalströme nicht möglich ist. Der Grund hierfür liegt vermutlich in den besonderen Konzentrationsverhältnissen an der Phasengrenze passiviertes Eisen/Elektrolyt unmittelbar nach der Repassivierung.

Die der Passivierung vorausgehende Potenzialerhöhung des aktiven Eisens durch die Reduktion des Wasserstoffperoxids verursacht eine Verarmung an Wasserstoff-Ionen in unmittelbarer Nähe der Eisenoberfläche, so dass die Lokalströme am Ende der Welle (Abb. 3, unterer Teil) durch die zu geringe Wasserstoff-Ionen-Konzentration keine Auflösung der kurz zuvor gebildeten Oxidschicht bewirken können. Hierbei handelt es sich also um das Analogon zur Refraktärzeit am Nerven.

Die saltatorische Erregungsleitung im Modellversuch

Im Gegensatz zu marklosen weisen markhaltige Nervenfasern so genannte *Myelinscheiden* auf, die in bestimmten Abständen (1 bis 3 mm) durch die *Ranvierschen Schnürringe* unterbrochen sind. Da die Myelinscheide als Isolator wirkt, ist die Auslösung eines Aktionspotenzials nur in den frei liegenden Bereichen möglich. Entsprechend erfolgt die Weiterleitung der Erregung sprunghaft (*saltatorisch*) von Schnürring zu Schnürring, was im Vergleich zur Erregungsleitung an marklosen Nervenfasern mit einer deutlich höheren Fortpflanzungsgeschwindigkeit verknüpft ist.

Um die veränderte Struktur der markhaltigen Axone im Modell zu realisieren, soll im folgenden Experiment die Aktivierungsausbreitung auf einem stückweise isolierten Reineisenstab untersucht werden, wobei die isolierten Bereiche den Schwannschen Zellen und die freiliegenden kleineren Flächen den Ranvierschen Schnürringen entsprechen sollen.

Versuch 2: Simulation der saltatorischen Erregungsleitung

Geräte und Chemikalien: Kunststoffwanne, Pinzette, 100-mL-Messzylinder, 2 50-mL-Messzylinder, 200-mL-Becherglas, Papiertücher, Schmirgelpapier, Reineisenstab, Zinkelektrode, Kunststoffisolierstücke, Wasserstoffperoxid, $w(\text{H}_2\text{O}_2) = 30\%$, (ätzend, C), Schwefelsäure, $c(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1 \text{ mol/L}$ (Titrisol) (reizend, Xi).

Versuchsdurchführung: Der intensiv geschmirgelte Eisenstab wird alle 5–6 mm mit den Kunststoffisolierstücken ummantelt.

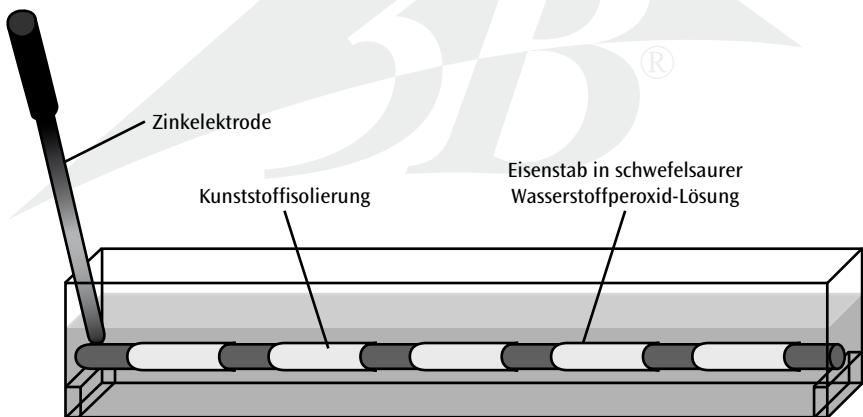


Abb. 4: Versuchsaufbau zur Simulation der saltatorischen Erregungsleitung

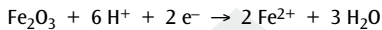
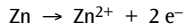
Danach wird der Eisenstab in das Versuchsgefäß gelegt, das einen Elektrolyten aus 97,5 mL Wasser, 27,5 mL der Schwefelsäure-Lösung und ca. 33 mL der Wasserstoffperoxid-Lösung enthält. Sollte die Gasentwicklung nach wenigen Sekunden nicht aufhören, hebt man den Eisenstab mit Hilfe einer Pinzette kurz aus dem Elektrolyten und taucht ihn anschließend wieder ein. Nun wird eine nicht-isolierte Stelle an einem Ende des Eisenstabes mit der Zinkelektrode kurz (ca. 1 s) berührt (Abb. 4).

Beobachtung: Legt man den Eisenstab in die Lösung hinein, so ist in den nicht-isolierten Bereichen die Entstehung von Gasbläschen wahrnehmbar, die jedoch sehr schnell zum Erliegen kommt. Der Kontakt mit der Zinkelektrode löst erneut eine Gasentwicklung aus, die sich wie eine Welle von der Kontaktstelle beider Metalle über die frei liegenden Stellen der Eisenoberfläche ausbreitet, während in den isolierten Bereichen keine Reaktion beobachtbar ist. Es ist klar erkennbar, dass die Welle das Stabende deutlich schneller erreicht als in Versuch 1. Danach geht der Eisenstab wieder in den passiven Zustand über.

Diese Erscheinung kann mehrmals hintereinander hervorgerufen werden. Bei einem neuen Versuchsansatz ist es für ein sicheres Gelingen jedoch unabdingbar, das Gewebeband vollständig zu entfernen und vor erneuter Isolierung den Eisenstab gründlich abzuschmirgeln.

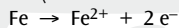
Bitte beachten Sie auch hier die in Versuch 1 genannten Hinweise!

Deutung: Die Passivierung der freiliegenden Eisenoberfläche beim Eintauchen in die Lösung verläuft nach dem in Versuch 1 bereits diskutierten Mechanismus. Der Grund für die höhere Geschwindigkeit der Potenzialwelle liegt im Mechanismus der Weiterleitung: Durch die Berührung mit der Zinkelektrode kommt es auch hier zur lokalen Reduktion der Eisenoxidschicht



und folglich zum Auftreten von Lokalströmen, die zur Aktivierung benachbarter Gebiete führen.

Lokalanode (aktive Eisenoberfläche):



Lokalkathode (passive Eisenoberfläche):

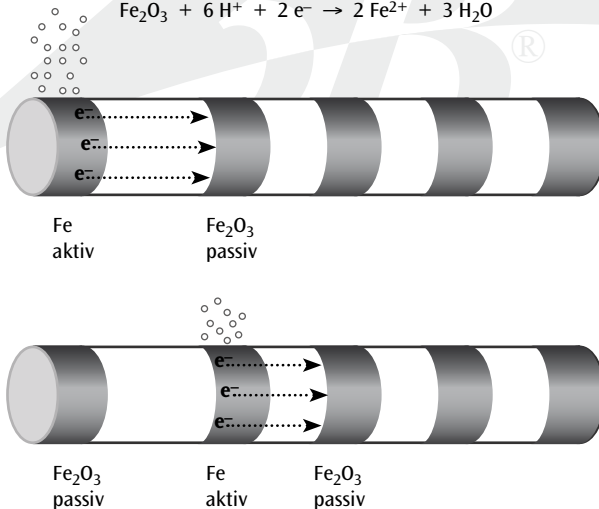
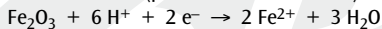


Abb. 5: Mechanismus der diskontinuierlichen Aktivierungsausbreitung

Erreicht die Aktivierungswelle den ersten ummantelten Bereich, wird die Weiterleitung des elektrischen Impulses zum nächsten freiliegenden Sektor nicht durch die zeitaufwendige Reduktion der Oxidschicht gebremst und erfolgt daher mit einer viel größeren Geschwindigkeit (Abb. 5). Hier setzen nun der Abbau der Deckschicht und die sich daraus ergebenden Lokalströme innerhalb einer „Einschnürung“ wieder ein. Die Weiterleitung der Aktivierung erfolgt demnach wie die saltatorische Erregungsleitung diskontinuierlich von einer Einschnürung zur anderen.

Bitte entfernen Sie nach Beendigung des Versuchs die Ummantelungen und waschen Sie diese gründlich mit Wasser ab.

Die synaptische Erregungsleitung im Modellversuch

Die Übertragung von Nervensignalen z. B. auf Muskelfasern geschieht in Synapsen, die die Schnittstelle zwischen axonaler Endung und der postsynaptischen Membran darstellen (motorische Endplatte). Erreicht ein Aktionspotenzial den synaptischen Spalt, wird ein Neurotransmitter an der präsynaptischen Membran freigesetzt, dessen Moleküle über den Spalt diffundieren und an der postsynaptischen Membran depolarisierend wirken. Erreicht das Endplattenpotenzial an der postsynaptischen Membran den Schwellenwert, so löst es in der Umgebung der Endplatte ein normales Aktionspotenzial aus.

Der folgende Versuch beschreibt natürlich kein vollständiges Modell der synaptischen Erregungsleitung, jedoch kann das Übertragungsprinzip im vorgestellten Modellsystem in anschaulicher Weise demonstriert werden.

Versuch 3: Ein Modellexperiment zur Informationsübertragung durch Neurotransmitter

Geräte und Chemikalien: Wie bei Versuch 1.

Zusätzlich wird benötigt: Tropfpipette, konz. Natriumchlorid-Lösung.

Versuchsdurchführung: Wie bei Versuch 1 mit folgender Änderung: Der Eisenstab wird nicht mit der Zinkelektrode berührt, sondern es werden einige Tropfen der Natriumchlorid-Lösung in das Versuchsgefäß gegeben (Abb. 6).

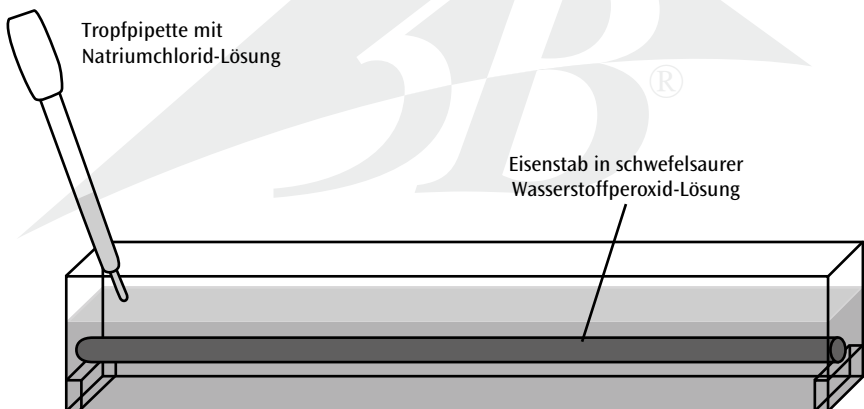
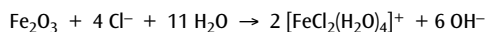


Abb. 6: Versuch zur Simulation der synaptischen Erregungsübertragung

Beobachtung: Nach ungefähr 1 Minute läuft plötzlich eine Aktivitätswelle ausgehend von dem Ende, an dem die Natriumchlorid-Lösung zugesetzt wurde, über den zuvor blanken Eisenstab. Die ersten Zentimeter des Eisenstabes verbleiben danach im aktiven Zustand, während die restliche Oberfläche periodisch von Potenzialwellen durchlaufen wird.

Deutung: Die Aktivierung des Eisenstabes ist auf die Anwesenheit der Chlorid-Ionen zurückzuführen. Sobald sie in ausreichender Menge zum Stab diffundiert sind, führt ihre komplexierende Wirkung zum Abbau der Oxidschicht:



Die Freilegung eines Teils der Oberfläche führt nun wiederum zur Lokalstromtätigkeit und somit zur Entstehung einer Aktivitätswelle.

Im Gegensatz zu den neurophysiologischen Abläufen an der Synapse, bei denen die Neurotransmitter durch ein Enzym nach kurzer Zeit gespalten werden, um eine Dauererregung zu verhindern (z.B. Acetylcholin durch Acetylcholinesterase), werden im Modellversuch die aktivierend wirkenden Chlorid-Ionen nicht abgebaut. Somit wird die vollständige Repassivierung des Eisens, wie z.B. nach kurzem Kontakt mit einer Zinkelektrode, durch die permanente Anwesenheit am Anfang des Stabes verhindert, so dass dieser Bereich kontinuierlich im aktiven Zustand verbleibt. Dieser Dauerreiz bewirkt die rhythmische Auslösung von Potenzialwellen.

Schlussbetrachtung

Mit dem Experimentiererset wird ein neues elektrochemisches Modellsystem vorgestellt, das zahlreiche Analogien zu den neurophysiologischen Vorgängen bei der Entstehung und Weiterleitung einer Erregung an realen Nervenfasern aufweist.

In der nachfolgenden Tabelle sind die wesentlichen Übereinstimmungen zwischen den Vorgängen am Axon und denen im Modellsystem noch einmal zusammengefasst:

Nervenzelle	Modell
Axonmembran	Eisenoxidschicht auf der Oberfläche des Eisenstabes
Axoninneres	Elementares Eisen
Extrazelluläre Gewebeflüssigkeit	Schwefelsaure Wasserstoffperoxid-Lösung
Ruhemembranpotenzial	Potenzial des passiven Eisens
Die Zellmembran der Nervenfaser ist im Ruhezustand für Natrium-Ionen nicht permeabel	Undurchlässigkeit der Eisenoxidschicht für Ionen und Moleküle
Depolarisation	Elektronenzufuhr durch Kontakt mit einer Zinkelektrode
Permeabilitätssteigerung der Zellmembran für Natrium-Ionen bei Erregung	Verletzung der Oxidschicht durch eine elektrische oder chemische Störung
Aktionspotenzial	Potenzialänderung bei Aktivierung
Erregung	Aktivierung
Geringe Potenzialdifferenzen zwischen erregten und nicht erregten Bereichen an der Zellmembran induzieren Lokalströme, die zur Fortpflanzung eines Aktionspotenzials führen.	Geringe Potenzialdifferenzen an der Grenze zwischen aktiver und passiver Eisenoberfläche induzieren Lokalströme, die zur Weiterleitung der Aktivitätszone führen.
Nach einer Erregung erfolgt die Rückkehr in den Ausgangszustand (Repolarisation)	Regenerierung der Oxidschicht nach eingetretender Aktivierung durch die oxidierende Wirkung des Wasserstoffperoxids (Repassivierung)
Refraktärzeit	Keine Aktivierung frisch repassivierter Bereiche durch Lokalströme
Sprunghafte (saltatorische) Erregungsausbreitung am markhaltigen Nerven, verknüpft mit einer größeren Leitungsgeschwindigkeit	Sprunghafte Aktivierungsfortpflanzung am stückweise isolierten Eisenstab; die Wanderungsgeschwindigkeit steigt um das Vierfache an

Tab. 1: Zusammenfassung der Analogien zwischen Modell- und Realsystem

Zahlreiche Unterrichtserfahrungen haben gezeigt, dass dieses neue Modellsystem auf die Schülerinnen und Schüler sehr motivierend wirkt. Die in Gruppenarbeit durchgeführten Versuche funktionierten stets ausgezeichnet, und insbesondere die Ausbreitung der Aktivitätswelle beeindruckte die Lernenden. Schon während der Experimentierphase ist den Schülerinnen und Schülern die Analogie zur Erregungsleitung am Nerven aufgefallen.

So hörte man Kommentare wie: „*Das ist ja wie bei der Erregungsleitung im Nervensystem; der Schwellenwert ist überschritten;...*“. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die Schülerinnen und Schüler durch Anwendung ihres in den vorherigen Stunden erworbenen Wissens den Mechanismus der Aktivierungsausbreitung selbstständig und sachlogisch entwickeln konnten. In einem fruchtbaren Unterrichtsgespräch wurden dann die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen dem Modellsystem und den Vorgängen am Neuron diskutiert. Das Spannendste aber war für die Schülerinnen und Schüler die Erkenntnis, mit diesem Modellsystem *die Brücke zwischen der Biologie und der Chemie* schlagen zu können.



3B SCIENTIFIC® PRODUCTS

3B Scientific GmbH

Rudorffweg 8 • 21031 Hamburg • Germany
Tel.: + 49-40-73966-0 • Fax: + 49-40-73966-100
www.3bscientific.com • 3b@3bscientific.com

© Copyright 2008 for instruction manual and design of product:
3B Scientific GmbH, Germany