

# Vierteljahrschrift

2|2025  
Jahrgang 170

der Naturforschenden Gesellschaft  
in Zürich NGZH



## 4 Wettlauf mit der Quaggamuschel

Die rasante Ausbreitung der gebietsfremden Art bedroht die Ökosysteme in unseren Gewässern und stellt die Wasserversorgung vor neue Probleme.

## Brief des Präsidenten

Die Titelgeschichte über die Quaggamuschel und mein dritter Artikel über die Grundlagen der Künstlichen Intelligenz (KI) haben viele Parallelen. In beiden Fällen geht es um Veränderungen, welche das Potenzial haben, die bisher etablierten Systeme grundlegend zu verändern. Die Quaggamuschel verändert die Ökosysteme in unseren Seen und verdrängt heimische Organismen. Ihre Überlegenheit ist derart ausgeprägt, dass ihr Vormarsch nicht aufzuhalten ist. Analog verhält es sich mit Anwendungen der KI, die erstmals in der Geschichte der Menschheit ein Territorium erobern, das bisher unbestritten exklusiv dem Menschen vorbehalten schien.

Dass viele repetitive Arbeiten automatisiert und durch Maschinen ersetzt werden können, daran haben wir uns inzwischen gewöhnt. Trotzdem hielt sich die Überzeugung hartnäckig, dass insbesondere kreative Tätigkeiten nie durch Maschinen ersetzt werden könnten. Diese Überzeugung gerät nun zunehmend ins Wanken.

Wo ist KI uns weit überlegen? Ein KI-System lässt sich mit einer unvorstellbaren Informationsmenge (z. B. mit grossen Teilen des Internet, das in vielen verschiedenen Sprachen geschrieben ist) innert Wochen trainieren, während ein einzelner Mensch ein ganzes Leben braucht, um einen winzigen Teil davon zu lernen. Mein dritter Artikel über KI legt deshalb viel Gewicht auf das Training von KI-Systemen und erklärt, wie es im Prinzip funktioniert. Auch wenn die heutigen Transformer und LLMs (Large Language Models) viel kompliziertere Strukturen haben, die Grundprinzipien sind dieselben geblieben und können mit Hopfield-Netzwerken und Boltzmann-Maschinen weitgehend verstanden werden.

Erwähnt werden sollen an dieser Stelle zwei Anlässe: Am 7. Juni fand eine Exkursion in die Drumlinlandschaft im Zürcher Oberland mit 10 Teilnehmerinnen und Teilnehmern statt. Darüber werden wir im nächsten Heft berichten.



Dieses Bild entsteht, wenn man auf <http://huggingface.com> beim KI-computer FLUX-Pro Unlimited «Mona Lisa working with laptop computer» eingibt.

Am 30. Juni konnten wir eine Delegation des Winogradsky Club von Kiew mit 32 Leuten begrüssen, die im ETH-Zentrum eine zweistündige Präsentation über die Aktivitäten des Clubs in Lehre und Forschung gaben.

Das längerfristige Ziel besteht darin, mit der ETH Zürich ein Zusammenarbeitsprogramm zu entwickeln. Mein Beitrag über den Winogradsky Club in der VJS 4|2024 zeigt, wie es vor 135 Jahren zum Kontakt zwischen Winogradsky und der ETH kam. Die Mitglieder der NGZH, die per eMail erreichbar sind, habe ich kurzfristig zu dieser Präsentation eingeladen. Ich werde im nächsten Heft ausführlicher über diese ausserordentliche Veranstaltung berichten.

Fritz Gassmann

**ngzh**

• • • • •

Naturforschende  
Gesellschaft in Zürich  
[www.ngzh.ch](http://www.ngzh.ch)

– AKTUELL

4 **Wettlauf mit der  
Quaggamuschel**

22 IMPRESSUM

23 AGENDA

– MEDIZIN

9 Mit präzisen Daten den Tumor gezielter bekämpfen

– PHYSIK IM ALLTAG

10 Wie KI funktioniert – vom Hopfield-Netzwerk zur Boltzmann-Maschine

– CHEMIEOLYMPIADE

18 Schweizer Talente auf dem Sprung nach Dubai

**AUS DEM ARCHIV**

Die NGZH verfügt über ein reichhaltiges Archiv an interessanten Publikationen, die im Laufe ihrer langen Geschichte veröffentlicht wurden. Das umfangreiche Material ist auf unserer Webseite frei zugänglich.

Alle Dokumente und auch die Aufzeichnungen der Online-Vorträge finden sich unter:  
<https://ngzh.ch/events>

In seichten Seeteilen ist oft der gesamte Seegrund von Quaggamuscheln bedeckt. Dieses Bild vom 19.10.2022 stammt aus 13 Meter Tiefe im Bodensee, in der Nähe von Romanshorn (Foto: Eawag)

## Wie lässt sich die Ausbreitung der Quaggamuschel stoppen?

Seit etwa 10 Jahren ist die Quaggamuschel nun in der Schweiz. Sie ist eine der einflussreichsten invasiven Arten in unseren Seen, und sie ist auch zunehmend in den Medien als wichtiges Thema präsent. Trotz der grossen Aufmerksamkeit bleiben viele Fragen zur Quaggamuschel bis heute offen und eine praktikable Methode, die Muschel wieder loszuwerden, ist nicht in Sicht. Verschiedene Schweizer Gewässer sind aber bis heute verschont geblieben. Diese Gewässer gilt es nun so lange wie möglich zu bewahren.

### Eine Muschel erobert die Schweiz

Die Quaggamuschel (*Dreissena rostriformis bugensis*) ist eine bei uns gebietsfremde, invasive Muschelart, die unsere Gewässer zunehmend unter Druck setzt. Als «invasiv» werden nicht-einheimische Arten bezeichnet, die sich ausserhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebiets etablieren und dadurch einheimische Arten verdrängen und zu ökologischen, ökonomischen sowie gesundheitlichen Schäden führen können.

Invasive Arten können sich negativ auf die lokale Artenvielfalt auswirken und die Prozesse und Eigenschaften von Ökosystemen beeinflussen, wodurch auch deren Nutzung durch den Menschen beeinträchtigt werden kann. Gemeinsam mit der nahe verwandten Zebrauschel (*Dreissena polymorpha*), zählt die Quaggamuschel zu den problematischsten invasiven Arten in Süsswasserökosystemen der nördlichen Hemisphäre. Beide gelten als äusserst anpassungsfähig und haben das Potenzial, erhebliche ökologische und wirtschaftliche Schäden zu verursachen.

Beide Arten sind in Seen und langsam fließenden Gewässern aufzufinden, wo sie sich mit sogenannten Byssusfäden an den Untergrund anheften. Sie können sich aber auch aktiv mithilfe ihres Fusses fortbewegen. Sie ernähren sich, indem sie einen Wasserstrom erzeugen und so Phytoplankton (Algen) aus dem Wasser filtern.

Die beiden invasiven Dreissena-Arten sind getrenntgeschlechtlich und pflanzen sich über ein freischwimmendes Larvenstadium fort. Weibchen und Männchen stossen regelmässig Eizellen bzw. Spermien aus, wobei die Befruchtung frei im Wasser stattfindet. Daraus entwickeln sich sogenannte Veligerlarven, welche keinen Zwischenwirt für die

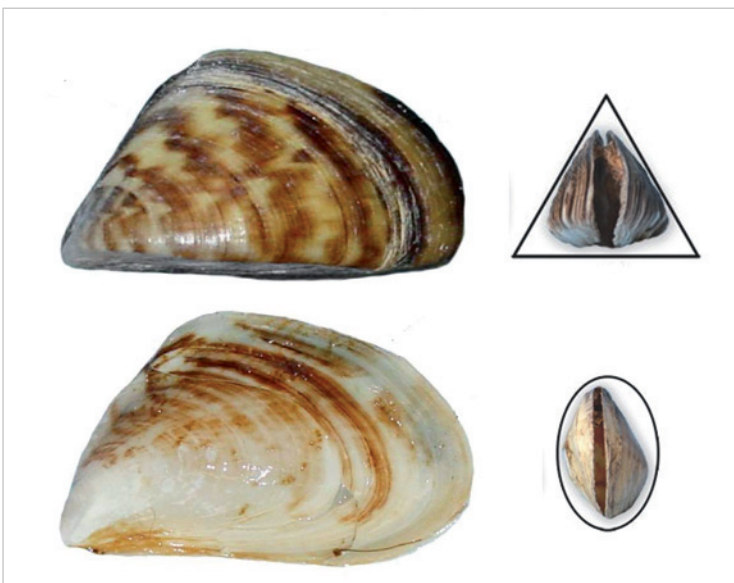


Abb. 1: Zebra- (oben) und Quaggamuschel (unten) lassen sich anhand ihrer Form und Zeichnung unterscheiden (s. Ausführungen im Text). (Bild: Kombination aus Aufnahmen von Amy Benson (USGS) und John Karl (Minnesota Sea Grant))



Abb. 2: Quaggamuscheln im Genfersee bei Rivaz (Foto: Linda Haltiner)

weitere Entwicklung benötigen, anders als dies bei vielen einheimischen Muschelarten der Fall ist. Nach einigen Wochen im Plankton wandeln sich die Larven zu jungen Muscheln und können sich am Substrat fixieren.

Auf diese Weise können sich die beiden Arten in kürzester Zeit vermehren, ausbreiten und erfolgreich neue Lebensräume besiedeln. Ein wichtiger Unterschied zur Zebramuschel ist allerdings, dass die Quaggamuschel sowohl Hart- als auch Weichsubstrat besiedeln kann und dies bis zum Seegrund, wenn genügend Sauerstoff vorhanden ist.

Im Genfer- und Bodensee wurden Quaggamuscheln in Tiefen von über 250 Metern unter der Wasseroberfläche gefunden. Im Gegensatz zur Zebramuschel, kann sich die Quaggamuschel bereits ab einer Temperatur von 5°C fortpflanzen, in unseren Gewässern also nahezu ganzjährlich. Ihr Reproduktionspotenzial übertrifft das der Zebramuschel aber auch im Sommer bei weitem. Diese Eigenschaften machen die Quaggamuschel zu einer konkurrenzstarken Invasorin, welche in den meisten Fällen

die Zebramuschel und viele andere Arten verdrängen kann.

### Unterschiedliche Formen

Unterscheiden kann man die beiden Dreissena-Arten am einfachsten an der Form ihrer Schale. Die Schalenunterseite der Zebramuschel (Abb. 1, oben) ist um einiges breiter als die Oberseite und bildet eine von zwei Kanten begrenzte Fläche, auf der die Muschel problemlos senkrecht aufgestellt werden kann (untere Seite des Dreiecks). Quaggamuscheln (Abb. 1, unten), mit ihrer eher mandelförmigen Schale, kippen um, wenn man sie versucht aufzustellen. Darüber hinaus zeigt die Zebramuschel oft ein markantes dunkelbraun gezacktes Muster, das sich von den farblich variablen, konzentrischen Ringen der Quaggamuschel unterscheidet.

Ein weiteres wichtiges Unterscheidungsmerkmal ist die Schliesslinie der beiden Schalenhälften auf der Unterseite der Muscheln: Während diese bei der Zebramuschel gerade verläuft, ist sie bei der Quaggamuschel leicht S-förmig geschwungen.

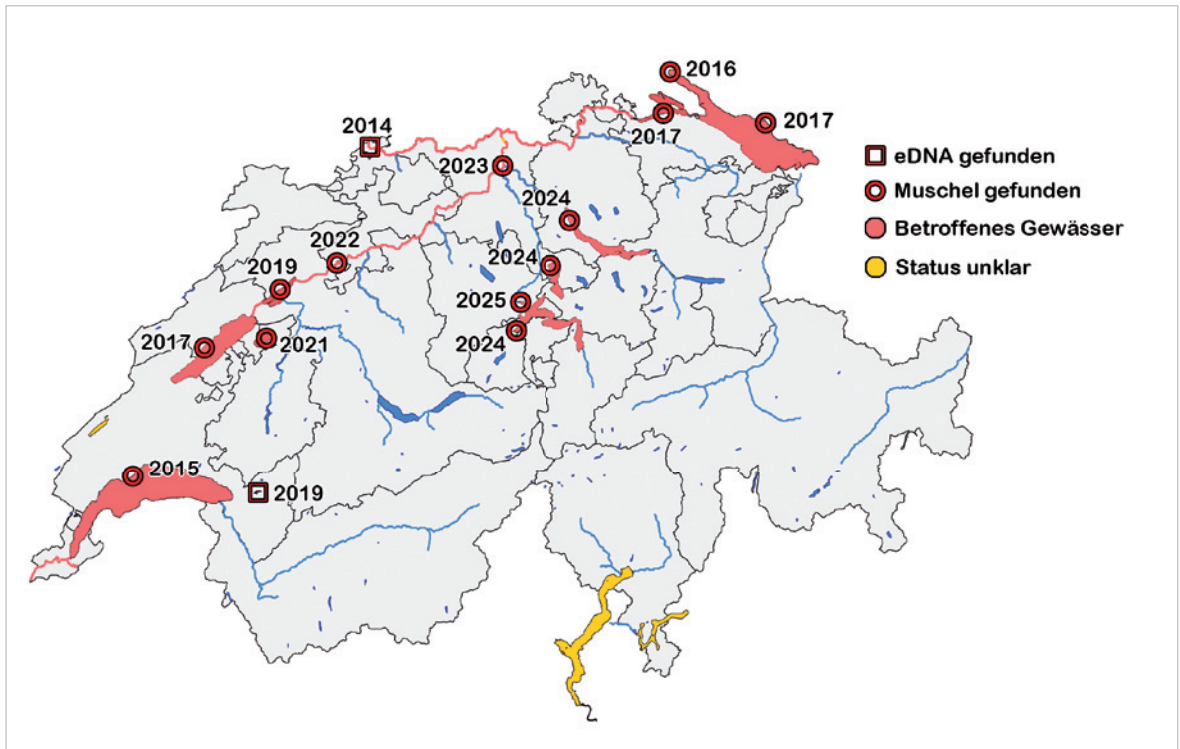


Abb. 2: Erstnachweise der Quaggamuschel in Schweizer Gewässern (betroffene Gewässer in Rot). Gelb markiert sind Seen, in denen unklar ist, ob sie von Quaggamuscheln besiedelt sind. In den grossen Tessiner Seen wurde 2022 Quaggamuschel-DNA in einer Umwelt-DNA-Probe gefunden, seither wurde dieser Fund aber nicht bestätigt. 2024 wurden Quaggamuscheln im Alpnachersee gefunden, im Sommer 2025 nun auch im Vierwaldstättersee. (Bild: Eawag)

### Vom Schwarzen Meer in die Alpen

Ursprünglich stammt die Quaggamuschel aus dem Dnepr Delta am Schwarzen Meer. Bereits in den 1990er-Jahren wurde sie vermutlich im Ballastwasser von Frachtschiffen in die Great Lakes Nordamerikas verschleppt und hat sich dort bis in grosse Tiefen flächendeckend über gesamte Seen ausgebreitet.

Einige Jahrzehnte später fand sie ihren Weg zurück nach Europa und ist mittlerweile in vielen Teilen Nordeuropas invasiv. Zum ersten Mal in der Schweiz wurde sie im Jahr 2014 in einer Umwelt-DNA-Probe im Rhein bei Basel nachgewiesen, bevor dann 2016 die erste Quaggamuschel im Bodensee gefunden wurde.

Einmal angekommen breitet sich die Quaggamuschel rasant aus und verdrängt die Zebromuschel in tieferen Seen komplett. Inzwischen sind in seichten Bereichen von Bodensee, Neuenburgersee, Bielersee und Genfersee im Schnitt mehrere 1000 Individuen pro Quadratmeter zu finden und diversen weiteren Schweizer Seen droht dasselbe Schicksal.

Auch wenn ein grosser Teil der Gewässer in der Schweiz bereits betroffen ist, bleiben viele Gewässer bis heute Quagga-frei (in Abb. 3 in Blau markiert). Diese verbleibenden Seen sollten nun geschützt werden.

### Problematik, Schäden, Gefahren

Die Quaggamuschel bringt in unseren Gewässern gleich mehrfach Probleme mit sich. Durch ihre extrem effiziente Fortpflanzung kann sie innert kurzer Zeit grosse Dichten erreichen, was für Ökosysteme, aber auch für die Infrastruktur verheerend sein kann. Da die Quaggamuschel auch in grösseren Tiefen vorkommt, werden insbesondere auch Infrastrukturen zur Wasserentnahme, welche häufig auf einer Tiefe von ca. 60 Metern installiert sind (also sicher vor dem Bewuchs mit Zebromuscheln), nicht verschont.

Quaggamuscheln können sich in Leitungen von Trinkwasseranlagen und Kühlsystemen festsetzen und diese mit potenziell verheerenden Folgen verstopfen. Deshalb müssen solche Infrastrukturen

mit hohem Kosten- und Zeitaufwand regelmässig von Muscheln befreit oder durch Sanierungen und Erweiterungen präventiv gegen Quaggamuscheln geschützt werden. Beispielhaft dafür sind die Sanierung der Wärme-Kälte Anlagen der EPFL in Lausanne und die Erneuerung des Seewasserwerks Ipsach am Bielersee. Dort wurden die Rohrsysteme bereits auf unterschiedlichem Weg gesichert, um zukünftige Kosten durch Muschelbefall zu umgehen. Neben solchen Infrastrukturen werden beispielsweise auch Netze von Berufsfischern befallen, welche ebenfalls regelmässig von Muscheln gereinigt werden müssen.

### Geringere Fangerträge für Fischer

Die Fischerei rechnet ausserdem mit rückläufigen Fangerträgen. Prognosen für die ökologischen Schäden basieren hauptsächlich auf Erfahrungen aus den Great Lakes in Nordamerika, wo die Quaggamuschel bereits 25 bis 30 Jahre früher als in der Schweiz eingeschleppt wurde. Es wird befürchtet, dass die Quaggamuschel die Schweizer Seen grundlegend verändern wird. Durch ihre enorme Filterleistung reduziert sie das pflanzliche Plankton im Wasser, wodurch sich die Nahrungsgrundlage für viele Zooplanktonarten verringert.

Die Nährstoffe, die dadurch entzogen werden, stehen dem Rest des Nahrungsnetzes nicht mehr zur Verfügung. Dies führt einerseits zu klarem Wasser, kann andererseits aber auch zu kleineren Fischbeständen führen. Die erhöhte Sichttiefe im Wasser begünstigt das Wachstum von Wasser-

pflanzen wie Makrophyten während sich am Seeboden dichte Muschelbänke bilden können. Insgesamt hat die Quaggamuschel somit das Potenzial, Nährstoffkreisläufe, die Artenzusammensetzung und das gesamte Nahrungsnetz unserer Seen zu verändern – mit unvorhersehbaren Folgen für die Biodiversität.

### Muscheln werden durch den Transport von Booten verschleppt

Während des Larvenstadiums können sich die Zebra- und die Quaggamuschel passiv mit der Strömung in Seen oder stromabwärts in Fliessgewässern ausbreiten. In Seen ermöglicht zudem die vertikale Durchmischung die Ausbreitung.

Eine ungewollte Weiterverbreitung der Muscheln in andere Gewässer kann beispielsweise durch angeheftete erwachsene Tiere am Rumpf oder durch Larven im Ballast-, Bilgen- oder Motorenkühlwasser von Schiffen und Freizeitbooten erfolgen. In der Schweiz konnten Freizeitboote als Vektoren für die Verschleppung von invasiven gebietsfremden Gewässerorganismen bestätigt und die Hauptverbreitungsrouten aufgezeigt werden.

Quaggamuscheln können bei solchen Transporten problemlos 5 Tage an der Luft überleben, bei hoher Luftfeuchtigkeit und niedrigen Temperaturen sogar länger. Auch beim Gewässerwechsel von Fischernetzen, Angel- und Tauchausrüstungen oder sogar kleineren Schwimmkörpern wie Stand Up Paddles (SUPs) ist eine Verschleppung möglich.

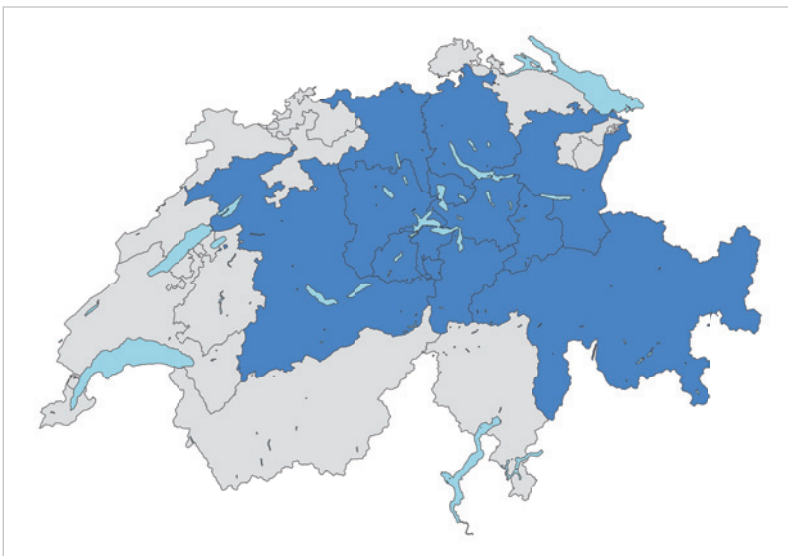


Abb. 3: Kantone mit Bootsreinigungs- und Meldepflicht (Stand Juni 2025). Weitere Informationen, sowie die Standorte aller anerkannter Reinigungsstellen sind u. a. auf der entsprechenden Website des Kantons Zürich verfügbar. (Bild: Eawag)

## 8 FORSCHUNG – AKTUELL

Um eine Weiterverbreitung zu verhindern, wurde in vielen Kantonen inzwischen eine Bootsreinigungs- und Meldepflicht eingeführt. In diesen Kantonen müssen alle immatrikulierten Schiffe vor jedem Transport in ein neues Gewässer an einer autorisierten Reinigungsstelle gereinigt werden und der Gewässerwechsel muss den zuständigen Behörden gemeldet werden. Kantone mit Melde- und Reinigungspflicht sind in **Abbildung 4** blau gekennzeichnet. Für kleinere Schwimmkörper wie Kajaks oder SUPs besteht mehrheitlich keine Reinigungspflicht, es wird aber empfohlen, auch diese durch Waschen und vollständiges Austrocknen von möglichen aquatischer Neobiota zu befreien. Die detaillierten Bestimmungen und Informationen zu den Reinigungsstellen können auf den jeweiligen kantonalen Webseiten gefunden werden.

### Quagga-freie Seen müssen geschützt werden

Derzeit sind keine Methoden in Sicht, die Quaggamuschel aus Seen zu entfernen, in denen sie bereits zu finden ist. Um noch unbefallene Gewässer zu schützen, müssen wir deshalb so viel wie möglich über ihre Ausbreitung und ihr Schadenspotenzial lernen. Dazu ist es wichtig, sowohl bereits betroffene als auch bislang unbesiedelte Gewässer regelmäßig zu überwachen und zu beproben, um alle Stadien einer Invasion zu erkennen und deren Entwicklung verfolgen zu können.

Um diese Monitoringaktivitäten schweizweit zu koordinieren und eine einheitliche Datenerfassung zu gewährleisten, wurde im Frühjahr 2025 eine zentrale Quaggamuschel-Fachstelle an der Eawag eingerichtet – gemeinsam mit dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) und der Eidgenössischen Fachkommission für biologische Sicherheit (EFBS).

Auf Grundlage dieser standardisierten Daten können wichtige Erkenntnisse über die Ausbreitung der Muschel gewonnen und wirksame technische sowie gesetzliche Massnahmen zur Bekämpfung entwickelt werden. So sollen Schäden für die Ökosysteme und die Nutzung unserer Gewässer künftig so gering wie möglich gehalten werden.

### Ausblick

Die Quaggamuschel ist gekommen, um zu bleiben. Da momentan eine aktive Bekämpfung nicht möglich erscheint, liegt der Fokus darauf, ihre weitere Ausbreitung zu stoppen oder zumindest zu verlang-

samen. So können die ökologischen Schäden eingedämmt und betroffene Infrastrukturen länger geschützt werden. Jedes quaggafreie Jahr in einem Gewässer ist ein gewonnenes Jahr. Diese Zeit gilt es zu nutzen, um unsere Infrastruktur besser vorzubereiten und innovative Lösungen zu entwickeln, die den Herausforderungen dieser invasiven Art gewachsen sind.

Thomas Müller, Linus Hofstetter, Piet Spaak

T. M. ist Mitarbeiter an der Quagga-Fachstelle der Eawag; L. H. ist Student Umweltnaturwissenschaften; P. S. ist ehem. Gruppenleiter Eawag, Projektleiter SeeWandel-Klima.

Korrespondenzadresse

Thomas Müller: [thomas.mueller@eawag.ch](mailto:thomas.mueller@eawag.ch)  
Quagga-Fachstelle: [quagga@eawag.ch](mailto:quagga@eawag.ch)

Weiterführende Informationen

Themen-Webseite der Eawag zur Quaggamuschel: [www.eawag.ch/de/info/portal/themen-im-fokus/quaggamuschel/](http://www.eawag.ch/de/info/portal/themen-im-fokus/quaggamuschel/)

Quellen

Flämig S., Bourqui M., Alexander J., Sturm L., Wellauer N. & Spaak P. 2024. Quaggamuschel: Monitoringkonzept und Empfehlungen zu Präventions- und Schutzmassnahmen. Eawag: Das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs. <https://doi.org/10.55408/eawag:33819>

Haltiner L., Pauquet G., Spaak P., Alexander J. 2021. SeeWandel Faktenblatt No. 02 - Die gebietsfremde Quaggamuschel erobert den Bodensee - drohen massive Folgen für das Ökosystem? SeeWandel. <https://seewandel.org/publikationen> (abgerufen am 06.06.2025)

Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfachliches (SVGW). 2020. Dossier Quaggamuschel. [www.svgw.ch/wasser/dossiers/dossier-quaggamuschel/](http://www.svgw.ch/wasser/dossiers/dossier-quaggamuschel/) (abgerufen am 06.06.2025)

Kanton Zürich, Sektion Biosicherheit. 2025. Vorsicht blinde Passagiere: Schiffsmelde- und -reinigungspflicht. [www.zh.ch/de/umwelt-tiere/umweltschutz/neu-gebietsfremde-arten--neobiota-/aquatische-neobiota-als-unbemerkte-fracht/schiffsreinigung.html](http://www.zh.ch/de/umwelt-tiere/umweltschutz/neu-gebietsfremde-arten--neobiota-/aquatische-neobiota-als-unbemerkte-fracht/schiffsreinigung.html) (abgerufen am 12.06.2025)

# Mit präzisen Daten den Tumor gezielter bekämpfen

Jeder Tumor ist einzigartig. Das macht es schwierig, die wirksamste Therapie für dessen Behandlung zu finden. Forschende in Zürich und Basel zeigen nun: Mithilfe modernster molekularbiologischer Verfahren lässt sich innerhalb von vier Wochen ein detailliertes Tumorphil erstellen, das eine massgeschneiderte Therapie ermöglicht. Die Studie ist die weltweit erste dieser Art.

Bei der Behandlung von Krebs stützen sich die Ärztinnen und Ärzte jeweils auf etablierte Leitlinien. Dank diesen wurden etwa bei schwarzem Hautkrebs (Melanom) in den letzten Jahren signifikant bessere Behandlungserfolge erzielt. Allerdings gibt es innerhalb der Standardtherapien oft mehrere Behandlungsoptionen, und es ist nicht immer eindeutig, welche Therapie am ehesten zum Erfolg führen könnte. Noch schwieriger wird es, wenn die Standardtherapien ausgeschöpft sind und es kaum fundierte Hinweise gibt, wie die Behandlung fortgesetzt werden könnte.

## Jede einzelne Zelle des Tumors

Welche Therapieform die beste ist wird bisher in erster Linie anhand des Ursprungsgewebes des Tumors sowie seiner genetischen Eigenschaften festgelegt. Im seit 2018 laufenden Tumor Profiler-Projekt wird nun untersucht, wie neue molekularbiologische Methoden helfen können, die Therapiemöglichkeiten zu verbessern und zu erweitern. Dafür machen sich die Forschenden zunutze, dass jeder Tumor bis in die einzelnen Zellen hinein einzigartig ist.

Die Forschenden analysieren dazu mit neun Technologien die Tumore auf Einzelzellebene. Dadurch entsteht ein umfassendes Bild der biologischen Vorgänge im Tumor. Dieses Wissen soll es möglich machen, aus den vorhandenen Therapieformen die individuell wirksamste Behandlung zu bestimmen. Der datenbasierte Ansatz erlaubt es zudem, Medikamente in die Evaluation einzubeziehen, die für die Behandlung anderer Krebsarten eingesetzt werden. Dadurch erweitert sich das Spektrum an Therapiemöglichkeiten.

In einer ersten Phase des Projekts wurde untersucht, welche molekularbiologischen Technologien relevante Informationen liefern. Zudem wurde in dieser Phase gezeigt, dass solche umfassenden

Analysen machbar sind und die enormen Datenmengen auch verarbeitet werden können. In einem weiteren Schritt ging es darum zu prüfen, wie das Tumorphil in der Praxis angewendet werden kann.

## Grosse Datenmengen bewältigbar

In einer prospektiven, multizentrischen Beobachtungsstudie untersuchte die Forschungsgruppe aus über 100 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern des Universitätsspitals Zürich, der Universität Zürich, der ETH Zürich, des Universitätsspitals Basel und der Firma Hoffmann-La Roche, ob dieser Ansatz in der Klinik machbar ist und ob er Vorteile bietet. Im Fokus stand dabei die Frage, wie lange es dauert, bis die Tumoranalyse vorliegt und wie die behandelnden Ärztinnen und Ärzte die daraus resultierenden Empfehlungen beurteilen – zwei zentrale Faktoren für die erfolgreiche Anwendung in der Praxis. Für die Studie wurden Tumoren von 116 Patientinnen und Patienten analysiert. Aus den resultierenden 43 000 Datenpunkten pro Probe wurden individuelle Behandlungsempfehlungen abgeleitet.

Die aus dem Tumorphil gelieferten Empfehlungen lagen jeweils nach vier Wochen vor und wurden in 75 Prozent der Fälle von den behandelnden Spezialisten als hilfreich beurteilt. Es zeigte sich zudem, dass die Patientinnen und Patienten, deren Behandlung auf Informationen aus den Profiler-Daten beruhte, häufiger auf die Therapie ansprachen als die Patientinnen und Patienten, die nicht am Programm teilnahmen.

Die ermutigenden ersten Resultate müssen nun noch in prospektiven und randomisierten klinischen Studien mit mehr Patienten bestätigt werden. Die beteiligten Forschenden sind aber überzeugt, dass diese Studie ein grosser Schritt in Richtung datenbasierte Medizin ist.

Der Artikel basiert auf einer Medienmitteilung der Universität Zürich

Quelle

Miglino N. et al. 2025. Feasibility of multiomics tumor profiling for guiding treatment of melanoma. *Nature Medicine*. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41591-025-03715-6>

# Wie KI funktioniert – vom Hopfield-Netzwerk zur Boltzmann-Maschine

Im letzten Heft habe ich das Hopfield-Netzwerk vorgestellt, das Muster – ähnlich wie unser Hirn – verteilt auf viele Neuronen speichert. In diesem Artikel zeige ich, welche Modifikationen Geoffrey E. Hinton vorgenommen hat, um die Nachteile von Hopfield-Netzwerken zu eliminieren und sie wesentlich leistungsfähiger zu machen. Dies führte schliesslich zur Entwicklung von «Transformern» und damit zu den KI-Systemen, die gegenwärtig die Welt erobern.

## Wie Geoffrey Hinton das Hopfield-Netzwerk modifizierte

Die seit den 1960er-Jahren versuchte Entwicklung der künstlichen Intelligenz kulminierte mit dem Backpropagation-Mechanismus. Dies war eine mathematische Optimierungsmethode, die interessante Ergebnisse lieferte, aber Ende der 1970er-Jahre in Ermangelung weiterer Entwicklungsmöglichkeiten in eine Krise geriet. John Hopfield suchte einen Neuanfang mit Konzepten, die sich stärker an biologischen Hirnen orientierten, und brachte damit neuen Schwung in die KI-Community. Dazu entwickelte er die sogenannten Hopfield-Netzwerke.

Um zu illustrieren, wie Geoffrey E. Hinton (Abb. 1) das Hopfield-Netzwerk weiterentwickelte, werde ich dieselben Muster verwenden, mit denen ich im vorhergehenden Heft das Hopfield-Netzwerk erklärt habe. Ich bleibe also bei Schriftzeichen auf einem  $5 \times 6$  Punkte Raster. Jedes Symbol entspricht jeweils einem 30 Bit langen Zeichen-Vektor, wobei 1 für Schwarz und 0 für Weiss steht. So lässt sich die *Boltzmann-Maschine*, wie Hinton sein Modell genannt hat, leichter mit dem Hopfield-Netzwerk vergleichen und auch besser verstehen. Was dieses Modell mit dem berühmten österreichischen Physiker Ludwig Boltzmann (1844-1906) zu tun hat, wird später klar werden.

Im vorhergehenden Artikel habe ich gezeigt, wie das Hopfield-Netzwerk in ungewollten Fixpunkten stecken bleiben kann. Diese ungewollten Fix-



Abb. 1: Geoffrey E. Hinton (geb. 1947) bei einem Vortrag in Toronto 2024. (Bild: Vaughn Ridley, wikimedia commons, CC BY 2.0)

punkte entsprechen Mustern, die nicht einprogrammiert wurden. Ein Beispiel war die Kombination der Zeichen F und O, die fälschlicherweise als stabiler Fixpunkt auftrat.

Hinton griff wie zuvor Hopfield auf das Ising-Modell des Ferromagnetismus zurück. Das Ising-Modell enthält als wichtigen Parameter die Temperatur. Die Bewegungsenergie der Atome in einem Kristallgitter ist proportional zur Temperatur. Obwohl diese an ihren Gitterplätzen festsitzen, können sie sich in allen drei Richtungen etwas hin- und herbewegen, also Schwingungen ausführen. In diesen Schwingungen steckt Energie, die proportional zur absoluten Temperatur (Masseinheit: Kelvin, K) ist. Beim absoluten Nullpunkt ( $0 \text{ K} = -273,15^\circ\text{C}$ ) ist diese Schwingungsenergie praktisch Null (bis auf die sehr kleine Nullpunktsenergie).

Erhitzt man einen Eisenmagneten über  $768^\circ\text{C}$  (die sogenannte Curie-Temperatur), verschwindet die Magnetisierung, weil die intensiven Temperatur-

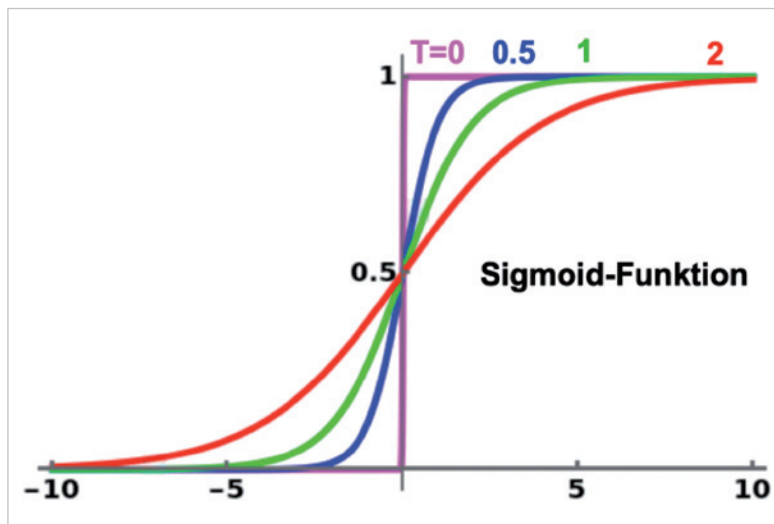


Abb. 2: Sigmoid-Funktion (auch Logistische Funktion genannt) für die «Temperaturen»  $T=0, 0,5, 1$  und  $2$ . Als Beispiel nehmen wir an, dass die Summe, die sich aus der Multiplikation der Gewichtsmatrix mit einem Zeichen-Vektor für eine bestimmte Komponente ergibt,  $5$  sei ( $x$ -Achse).

Die Normierung, also die Umwandlung der Komponente in  $1$  oder  $0$ , gestaltet sich nun etwas aufwändiger als bei Hopfield: Mit Hilfe eines Zufallszahlen-Generators wird im Intervall  $0 \dots 1$  ( $y$ -Achse) zunächst eine zufällige Zahl berechnet. Ist diese Zahl kleiner als der Wert auf der Sigmoid-Kurve der entsprechenden «Temperatur», wird die Komponente auf  $1$  gesetzt, wenn sie grösser ist auf  $0$ .

Beträgt die Zufallszahl z.B.  $0,6213$ , wird die Komponente bei einer «Temperatur» von  $2$  auf  $1$  gesetzt, da die Zahl kleiner ist als der Wert auf der roten Funktion. Beträgt die Zufallszahl hingegen  $0,9524$ , wird die Komponente bei einer «Temperatur» von  $2$  auf  $0$  gesetzt, weil sie höher ist als der Wert auf der roten Funktion. Beträgt die «Temperatur» hingegen  $1$ , wird die Komponente immer noch auf  $1$  gesetzt, da die Zufallszahl unter der grünen Funktion liegt. Bei einer «Temperatur» von  $0$  (violette Kurve) wird die Komponente bei positiven Summenwerten immer auf  $1$  gesetzt und auf  $0$  bei negativen Summenwerten (das entspricht dem Hopfield-Netzwerk). Die Grafik zeigt, dass selbst bei positiver Summe eine  $0$  für die Komponente umso wahrscheinlicher wird, je höher die «Temperatur» ist. (Bild Fritz Gassmann)

bewegungen die vorher parallel zueinander ausgerichteten «Elementarmagnetchen» aus der Ordnung bringen. Die Ordnung muss dann bei tieferer Temperatur durch ein äusseres Magnetfeld erst wieder hergestellt werden, um den Magneten zu reaktivieren. Das Ising-Modell kann all diese Vorgänge simulieren.

Hinton übertrug diesen Fluktuationsprozess in sein neuronales Netz, wobei die ursprüngliche Bedeutung der physikalischen Temperatur verloren ging und einfach als Mass für Fluktuationen verstanden werden soll. Um das zu verstehen, stelle man sich elektrische oder chemische Fluktuationen vor, die in einem biologischen Hirn auftreten. Ähnlich wie beim Begriff «Energie», der vom Ising-Modell übernommen wurde, sprechen die Physiker von der «Temperatur» des neuronalen Netzes, um die Fluktuationen zu beschreiben. Um anzudeuten, dass es sich hierbei um eine Übertragung handelt, werde ich im folgenden «Temperatur» wie «Energie» in Anführungszeichen schreiben.

Die «Temperatur» bzw. die Fluktuation bewirkt in einem neuronalen Netz, dass flache relative Minima verlassen werden können, indem die zufälligen Bewegungen das System sozusagen über die Ränder schubsen.

### Hinton baut «Temperatur» ein

Hinton hat die «Temperatur» nach bewährter physikalischer Manier ins Hopfield-Netzwerk so eingebaut, dass beim «absoluten Nullpunkt», also bei  $T=0$ , seine Boltzmann-Maschine identisch mit dem Hopfield-Netzwerk wird. So konnte er erreichen, dass sein Modell die interessanten Eigenschaften des Vorgängermodells behält.

In der Vierteljahrsschrift 1|2025 habe ich detailliert gezeigt, wie das Hopfield-Netzwerk funktioniert. Entscheidend ist dabei, dass ein beliebiger Vektor mit  $N$  Komponenten mit Hilfe der quadratischen und symmetrischen  $N \times N$ -Gewichtsmatrix  $w_{ik}$  in einen neuen Vektor derselben Länge transformiert werden kann. Multipliziert man die Gewichtsmatrix  $w_{ik}$  mit dem Vektor, entstehen Summen, die positiv oder negativ sein können. Hopfield hat die einfachste Methode gewählt, um wieder Vektoren mit Komponenten  $1$  oder  $-1$  zu erhalten: Ist die Summe positiv, wird die entsprechende Komponente auf  $1$  gesetzt, sonst auf  $-1$ . Eine solche Umrechnung, bei der aus Vektoren mit beliebigen Zahlen  $x$  als Komponenten wieder Vektoren mit Komponenten  $1$  oder  $-1$  entstehen, nennt man *Normierung*.

Hier hat Hinton angesetzt: Er hat die Komponenten mit den Werten  $-1$  durch die Werte  $0$  ersetzt

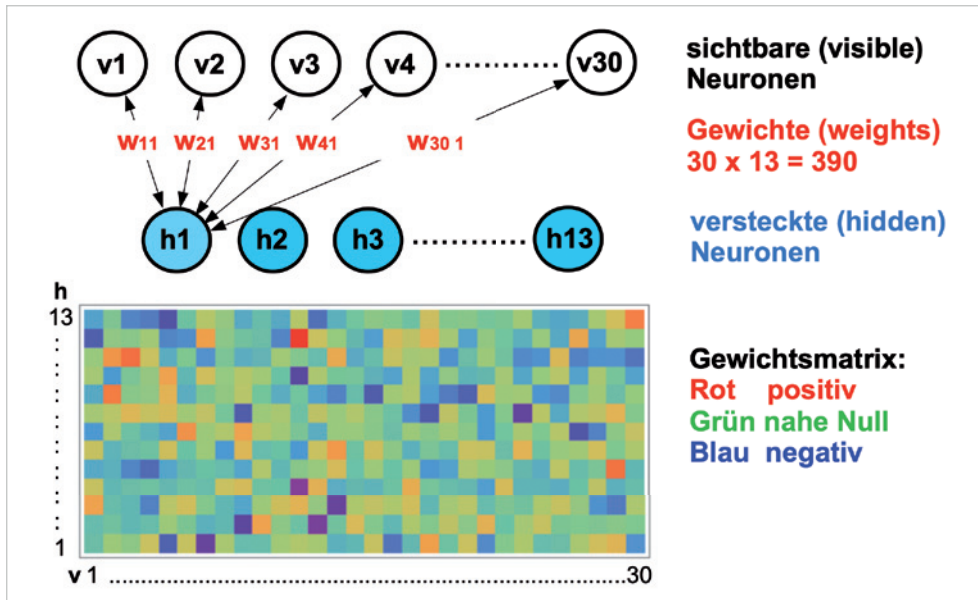


Abb. 3: Struktur der Restricted Boltzmann Machine. Die sichtbaren Neuronen ( $v_1 \dots v_{30}$ , in der oberen Hälfte der Grafik in Weiss dargestellt) sind untereinander nicht verbunden, sondern ausschliesslich mit den versteckten Neuronen ( $h_1 \dots h_{13}$ , blau). Diese sind wiederum untereinander nicht verbunden, doch kann jedes versteckte Neuron mit denselben Gewichten auf jedes sichtbare Neuron zurückwirken. Um die Figur nicht zu überladen, sind nur die Verbindungen zwischen dem versteckten Neuron  $h_1$  und einigen sichtbaren Neuronen eingezeichnet sowie deren Gewichte  $w_{i1}$  (Rot) angegeben.

In der unteren Hälfte ist ein Beispiel einer Matrix mit 390 Gewichten in Farbcodierung wiedergegeben. Diese Gewichtsmatrix ist nicht mehr quadratisch, sondern rechteckig, weil weniger versteckte als sichtbare Neuronen vorhanden sind. (Bild F. Gassmann)

(dies ist unwesentlich) und die Summe mit Hilfe einer Wahrscheinlichkeit in den neuen Zustand umgerechnet (dies ist wesentlich). Abb. 2 zeigt, wie dies funktioniert und welche Rolle die «Temperatur» dabei übernimmt. Wird  $T=0$  gesetzt, entsteht die Sprungfunktion (engl. *step function*), die Hopfield benutzt hat. Je grösser  $T$  ist ( $T$  kann nur eine positive Zahl sein), desto unsicherer wird der zu berechnende Vektor, d.h. bei mehrmaliger Berechnung entstehen umso unterschiedlichere Resultate.

### Hinton bringt Netzwerk «Lernen» bei

Im Hopfield-Netzwerk besteht die Gewichtsmatrix aus starren positiven oder negativen Zahlen, nachdem sie durch einen einmaligen Prägungsprozess erzeugt wurde. Diesen Prägungsprozess habe ich im vorhergehenden Artikel detailliert beschrieben, wobei ich auf die Neuronen fokussiert habe, um die Verwandtschaft mit biologischen neuronalen Netzwerken hervorzuheben.

Fokussieren wir jedoch auf die  $N$ -dimensionalen Vektoren und verwenden die Mathematik der Vektorrechnung, erhalten wir ein elegantes Resultat:

*Die in der Gewichtsmatrix eingepprägten Vektoren gehen bei der Multiplikation mit der Gewichtsmatrix nach der Normierung in sich selbst über, sie werden also reproduziert.* Mathematisch ausgedrückt:  $\text{Norm}(M \cdot F) = F$ . Dabei bedeutet Norm die Normierung nach Abb. 2,  $M$  ist die Gewichtsmatrix und  $F$  steht für einen in die Gewichtsmatrix eingepprägten Vektor. Da bei dieser Multiplikation alle  $N$  Teilschritte für die  $N$  Komponenten nun als einen Rechenschritt betrachtet werden, wird dieser grössere Schritt als *Epoche* bezeichnet. Da die Vektoren in unseren Beispielen immer  $N=30$  Komponenten haben, entsprechen 30 Rechenschritte im Hopfield-Modell nur einer Epoche im Hinton-Modell.

Im Hopfield-Modell beginnt man mit einem zufälligen Input-Vektor, multipliziert ihn mit der Matrix und normiert ihn anschliessend. So entsteht ein neuer und gleich langer Vektor, da die Matrix quadratisch ist. In einem Kreisprozess wird dieser neue Vektor wieder mit der Matrix multipliziert und dann normiert. Die Abb. 2 des Artikels im letzten Heft zeigt, wie sich aus diesem Kreisprozess das Muster  $F$  entwickelt. Nach dem oben erläuterten

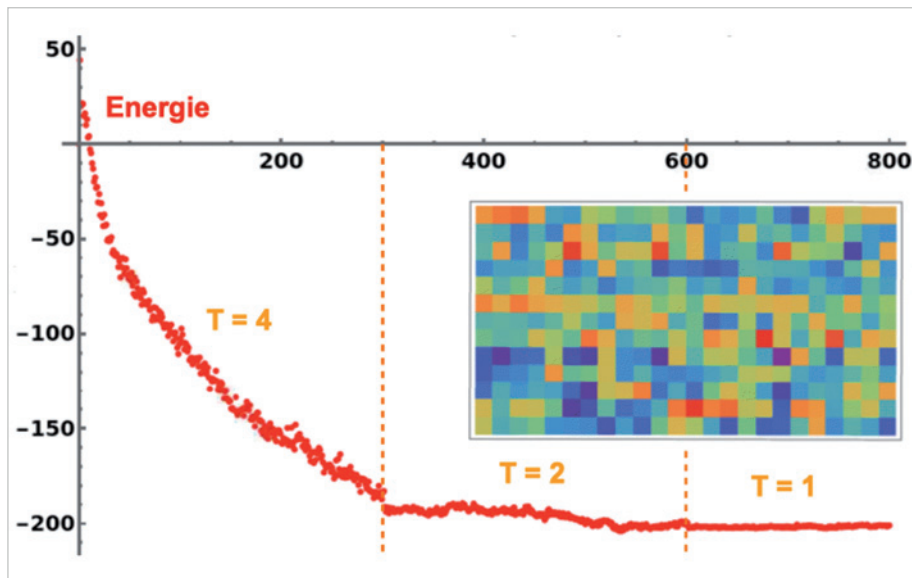


Abb. 4: Training der Hinton-Gewichtsmatrix mit 24 Symbolen in total 800 Epochen. Rote Punkte bedeuten die über die 24 Symbole gemittelte Energie. Der Start war bei 43 und das Energieminimum wurde nach rund 500 Epochen bei etwa -200 erreicht. Um die Rechnung zu beschleunigen, wurde die Temperatur für die ersten 300 Epochen auf 4 gesetzt: Die Fluktuationen sind deutlich zu sehen. Weitere 300 Epochen wurden mit  $T=2$  gerechnet, weshalb die Fluktuationen kleiner wurden. Der letzte Teil wurde mit  $T=1$  gerechnet und zeigt einen sehr ruhigen beinahe stationären Verlauf. Die trainierte Matrix nach 800 Epochen ist in einer Farbcodierung dargestellt. (Bild und Rechnung F. Gassmann)

eleganten Resultat passiert dann nichts mehr, selbst wenn der Kreisprozess weiterläuft, weil sich  $F$  nur noch reproduziert.

Nun kommt Hinton's entscheidende neue Idee dazu: Er hat gesehen, dass dieser Kreisprozess dem Abwärtsfließen von Wasser in einem strukturierten Gelände bis zum tiefsten Punkt entspricht. Eine geografische Geländeform, in der Wasser abwärts fließt, wurde jedoch durch frühere geologische Prozesse geformt und die heutige Form erinnert an diese Prozesse. Will man ein neuronales Netz lernfähig machen, müsste man sich demnach nicht auf das Abwärtsfließen des Wassers fokussieren, sondern auf die Geländeform. Der Lernprozess in einem neuronalen Netz entspricht dann dem geologischen Prozess, der zu einer langsamen Änderung des Geländes führt.

In einem neuronalen Netz entspricht die Geländeform der Gewichtsmatrix, dementsprechend müsste also die Gewichtsmatrix in kleinen Schritten umgeformt werden, um den langsamen geologischen Formationsprozess oder den biologischen Lernprozess zu simulieren. Es sei in diesem Zusammenhang an das französische Wort *formation* für *Bildung* oder *Ausbildung* erinnert.

Hinton hat diese Idee vorerst mit quadratischen Matrizen umgesetzt, aber dann mit Hilfe numerischer Experimente festgestellt, dass seine Boltzmann-Maschine noch viel interessanter wird, wenn er die Neuronen in zwei separate Schichten unterteilt, in sogenannte sichtbare und unsichtbare Neuronen, und gleichzeitig die Anzahl Verbindungen zwischen den Neuronen drastisch reduziert. Abb. 3 zeigt die Struktur seiner erfolgreichen *Restricted Boltzmann-Machine*.

Vergleichen wir nun das Modell von Hopfield mit demjenigen von Hinton etwas genauer: Bei Hopfield haben wir den Input-Layer mit  $N=30$  Neuronen, den wir durch Multiplikation mit der quadratischen Matrix  $Q$  und anschließender Normierung in den Output-Layer mit wiederum  $N$  Neuronen transformieren oder abbilden:  $\text{Out} = \text{Norm}(Q \cdot \text{In})$ . Um den Kreisprozess zu schließen, müssen wir nur noch den Output-Layer auf den Input-Layer kopieren ( $\text{In} = \text{Out}$ ) und schon ist die Epoche abgeschlossen und der iterative Prozess kann weitergehen. Die benötigte quadratische Matrix  $Q$  hat  $N^2=900$  Gewichte.

Bei Hinton beginnen wir mit demselben Input-Layer mit  $N=30$  Neuronen, multiplizieren diesen aber nun mit einer rechteckigen Matrix  $R$  mit

## 14 FORSCHUNG – PHYSIK IM ALLTAG

$N=30$  Kolonnen und  $M=13$  Zeilen (und anschliessender Normierung). Das Resultat dieser Abbildung  $H = \text{Norm}(R \cdot \text{In})$  ist ein komprimierter Vektor mit nur 13 Komponenten ( $H$  steht für Hidden, versteckt), den wir nicht mehr einfach auf den Input-Layer kopieren können. Wir brauchen also einen zusätzlichen *Expansionsschritt*, um wieder einen Vektor mit  $N$  Komponenten zu erzeugen und den Kreisprozess zu schliessen. Diesen Expansionsschritt erzeugen wir mit derselben Matrix, wobei wir allerdings die Kolonnen und die Zeilen vertauschen müssen, damit wir die kürzeren Vektoren  $H$  mit der Matrix multiplizieren können. Man nennt die so entstehende Matrix transponiert und bezeichnet sie als  $R^T$ :  $\text{Out} = \text{Norm}(R^T \cdot H)$ . Nun können wir den Kreisprozess wieder schliessen wie vorher:  $\text{In} = \text{Out}$ . Die für den gesamten zweiteiligen Prozess benötigte Matrix  $R$  hat nur  $N \times M = 390$  Gewichte.  $R^T$  ist keine zusätzliche neue Matrix, sondern nur die anders gelesene alte Matrix  $R$ . Für grosse Vektoren mit Millionen von Komponenten, wie sie beispielsweise für Bilder gebraucht werden, sind die Grössen der Matrizen entscheidend für den riesigen Bedarf an Speicherplatz, die Anzahl der Neuronen ist im Vergleich dazu sehr klein.

Das Fazit ist verblüffend: Die in **Abb. 3** wiedergegebene Hinton-Matrix enthält die Muster von 24 Symbolen, im Gegensatz zu nur 4 Symbolen in der grösseren Hopfield-Matrix.

Um die Gewichte in vielen Epochen langsam einzustellen, musste Hinton auch den einfachen Hopfield-Mechanismus anpassen: Mit dem *Kompressionsschritt* wird nach der Hopfield-Vorschrift eine sog. *Aktivierungsmatrix*  $A$  und im *Expansionsschritt analog* eine Aktivierungsmatrix  $A'$  berechnet.

Eine theoretische Ableitung zeigt, dass ein Lernschritt wie folgt aussehen muss:  $w_{\text{neu}} = w + \delta(A-A')$ . Die Matrizen  $A$  und  $A'$  haben beide  $30 \times 13$  Elemente wie  $w$  und das Update  $w$  zu  $w_{\text{neu}}$  muss für jedes der 390 Elemente durchgeführt werden.  $\delta$  ist der Lernschritt, der ausprobiert werden muss: Ist er zu gross (z.B. 10), wird die Rechnung instabil, ist er zu klein (z.B. 0,001), wird die Rechnung sehr langsam. Optimale Werte bei den hier wiedergegebenen Rechnungen waren  $\delta = 0,1 \dots 0,2$ .

**Abb. 4** zeigt, wie die mittlere «Energie» der Symbole während 800 Epochen des Lerntrainings von 24 Symbolen abnimmt. Sobald die minimale «Energie» erreicht wird, ist der Lernprozess abgeschlossen. Dies dauerte auf meinem Raspberry Pi (Computer der Grösse einer Zündholzschachtel) rund

eine Minute. Man vergleiche diese Zeit mit der Lernzeit eines Primarschülers für das Alphabet.

### Was passiert beim Training des neuronalen Netzes?

Vor dem Training wird die Gewichtsmatrix üblicherweise mit Zufallszahlen gefüllt, die schwerpunktmässig um Null herum liegen. Nach einem ersten Durchgang des in **Abb. 5** gezeigten zyklischen Lernprozesses (d.h. nach der ersten Epoche) ist die Rekonstruktion  $S_v'$  der Symbole noch sehr schlecht, weil die Matrix noch nicht entsprechend der Trainings-Symbole  $S_v$  geformt wurde.  $S_v'$  und  $S_v$  sind also noch verschieden und die Korrekturmatrizen  $A$  und  $A'$ , die in den beiden Teilschritten Kompression und Expansion berechnet werden, haben verschiedene Einträge. Deren Differenz multipliziert mit dem Lernschritt  $\delta(A-A')$  wird dann benutzt, um die Gewichtsmatrix schrittweise zu verbessern oder zu formen.

Wie das Hopfield-Netzwerk hat auch das Hinton-Netzwerk eine Kapazitätsgrenze, die sich aber nicht so einfach angeben lässt, weil sie von den zu lernenden Symbolen abhängt. Ich habe für mein Beispiel mit 30 sichtbaren und 13 versteckten Neuronen die Kapazitätsgrenze gesucht und sie bei gegen 24 Symbolen gefunden: Die Symbole  $N$  und  $W$  sind dem Netzwerk nicht mehr beizubringen, obwohl die Fehlleistung bei  $W$  noch verzeihlich erscheint. Man beachte aber, dass die geringere Höhe des rekonstruierten  $W$  von der ebenfalls geringeren Höhe von  $N$  herrührt. Das Netzwerk kann also nur die restlichen 22 Symbole einwandfrei lernen.

### Die trainierte Matrix kann neue Symbole generieren

Der Raum der sichtbaren  $S_v$ -Vektoren umfasst rund eine Milliarde ( $2^{30}$ ) verschiedene Symbole. Im Kompressionsschritt, bei dem die Matrix  $A$  entsteht, wird jeder  $S_v$ -Vektor mit 30 Komponenten auf einen versteckten  $S_h$ -Vektor mit nur 13 Komponenten komprimiert. Im Raum dieser  $S_h$ -Vektoren gibt es nur rund 8000 ( $2^{13}$ ) verschiedene Symbole, also etwa 130 000 ( $2^{17}$ ) mal weniger als im  $S_v$ -Raum.

Bei der nachfolgenden Expansion von 13 auf 30 Komponenten, bei der die Matrix  $A'$  entsteht, kann die Variabilität der möglichen Vektoren nicht wesentlich grösser werden, d.h. alles, was mit der «trainierten» Matrix später angefangen wird, spielt sich in einem sehr kleinen Teilraum des ursprüng-

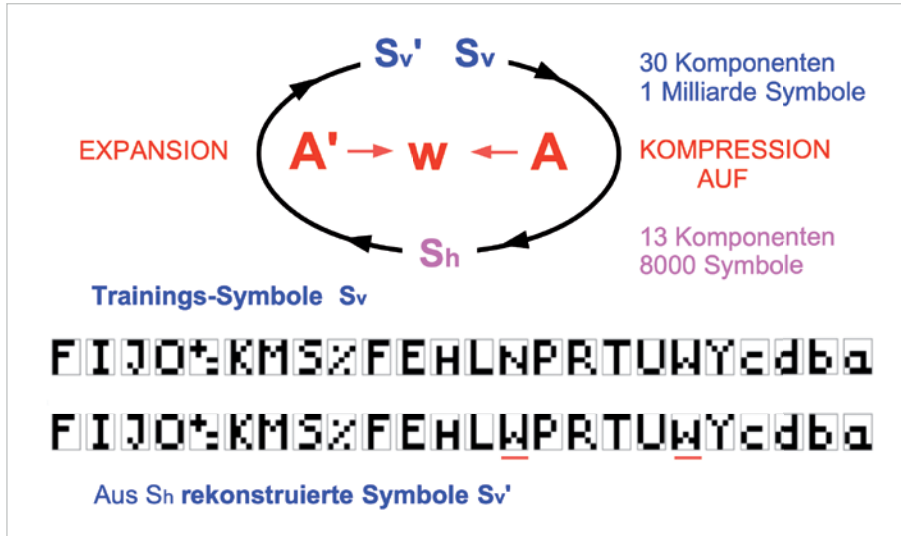


Abb. 5: Der zyklische Trainingsprozess formt die Gewichtsmatrix schrittweise um, bis die Trainings-Symbole  $S_v$  perfekt rekonstruiert werden, also  $S_v' = S_v$  werden. Dies ist beim Erreichen der minimalen «Energie» der Fall und dann wird auch  $A = A'$ , d.h. die Matrix  $w$  wird nicht mehr weiter umgeformt, weil  $\delta(A - A')$  Null wird. Die gezeigte Rekonstruktion ist jedoch nicht ganz perfekt: N und W bereiten Schwierigkeiten (vgl. Erklärungen im Text). (Bild F. Gassmann)

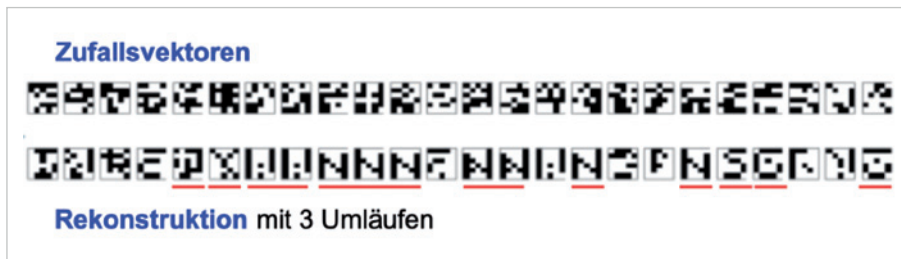


Abb. 6: Rekonstruktion von 24 zufälligen Vektoren mit Hilfe der auf unsere 24 Symbole trainierten Matrix. Der in Abb. 5 dargestellte Zyklus wurde dreimal durchlaufen. Die Rot unterstrichenen besonders interessanten Resultate sind im Text erklärt. (Bild F. Gassmann)

lich eine Milliarde Vektoren enthaltenden Raumes ab. Was dies bedeutet, soll am folgenden Beispiel verständlich gemacht werden.

Wir geben dem neuronalen Netz 24 zufällige Vektoren (mit je 30 Komponenten) vor und lassen mit jedem Vektor den in Abb. 5 dargestellten Zyklus dreimal durchlaufen, wobei wir den Lernschritt  $\delta = 0$  setzen, damit die Gewichtsmatrix nicht verändert, also nicht weiter geformt wird. Abb. 6 zeigt das Resultat.

Zur Erinnerung: Hätten wir trainierte statt zufällige Vektoren vorgegeben, würden in beiden Zeilen dieselben Symbole stehen (vgl. Abb. 5).

Als erstes kann festgestellt werden, dass alle rekonstruierten Symbole in der unteren Zeile eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Trainings-Set in Abb. 5

aufweisen. Die Resultate 9, 11 und 20 sind sogar identisch mit zwei Symbolen im Trainings-Set. Weiter sind die Resultate 10, 13, 14, 16 und 19 sehr nahe beim N im Trainings-Set. Auch 7, 8 und 15 lassen das W erkennen. Interessant und geradezu innovativ ist aber Nr. 21, das ein G sein könnte, obschon dies nicht im Trainings-Set enthalten ist. Ansprechend ist auch Nr. 24 als eine Art Smiley. Nr. 6 scheint eine Kombination von Y und K zu sein und Nr. 5 erinnert an ein menschliches, aber fremdländisches Symbol.

### Ein Blick auf die «Energie» zeigt, wie aus Chaos Kreativität wird

Abb. 4 zeigt, wie die mittlere «Energie» der Datenvektoren  $S_v$  beim Lernprozess abnimmt. Es lohnt sich jedoch, genauer hinzuschauen und die einzel-

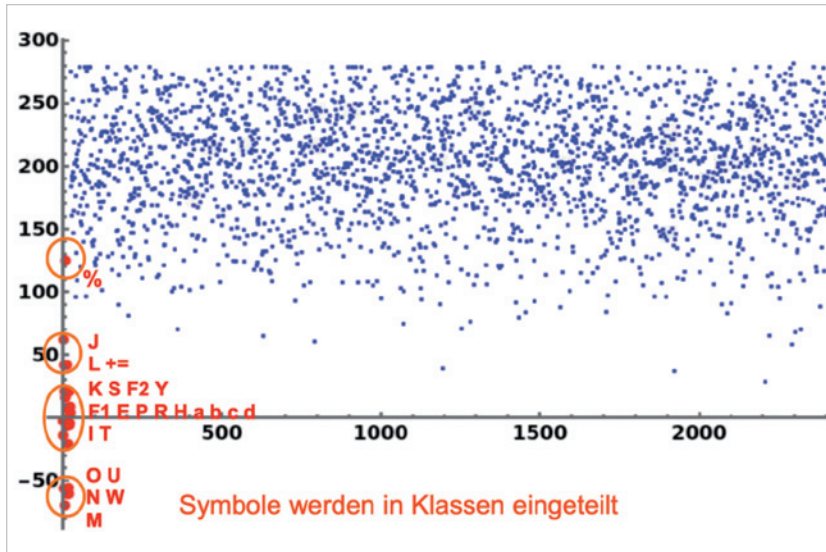


Abb. 7: «Energien» von 2400 zufälligen Vektoren (blau) und «Energien» der 24 trainierten Vektoren (rot). Durch das Training wird die Gewichtsmatrix derart verändert, dass die «Energie» der trainierten Vektoren reduziert wird. Die restlichen Vektoren konvergieren gegen eine Boltzmann-Verteilung (Exponentialverteilung), wenn das thermodynamische Gleichgewicht erreicht wird. Im hier gezeigten Beispiel ist dies der Fall unterhalb etwa 200. Oberhalb ist das Gleichgewicht noch nicht erreicht. Weitere Erklärungen im Text. (Bild und Rechnung F. Gassmann)

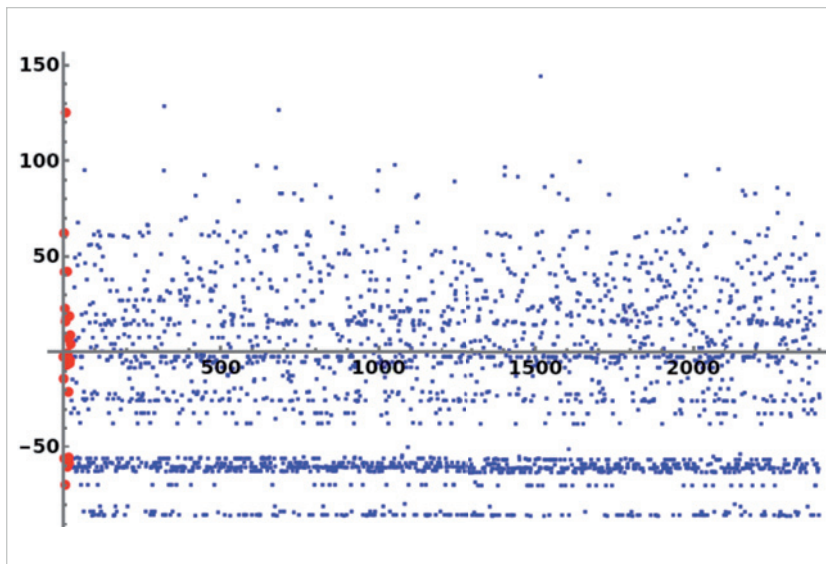


Abb. 8: Blaue Punkte: «Energien» der rekonstruierten 2400 zufälligen Vektoren mit Hilfe der auf unsere 24 Symbole trainierten Gewichtsmatrix. Der in Abb. 5 dargestellte Zyklus wurde je dreimal durchlaufen. Rote Punkte: «Energien» der trainierten Symbole. (Bild F. Gassmann)

nen Vektoren und auch die nicht trainierten Vektoren zu betrachten. Weil sich die «Energie» aus der Kombination der Gewichtsmatrix  $w$  mit den Vektoren  $S_h$  und  $S_v$  ergibt, [mathematisch formuliert ist  $E = S_h \cdot (w \cdot S_v)$ ], wirkt sich das Training auch auf die «Energie» der überwiegenden Mehrheit der Vektoren aus, die nicht beachtet wurden.

In Abb. 7 sind die «Energien» von 2400 der Milliarde nicht trainierter Vektoren als blaue Punkte dargestellt. Es ist klar erkennbar, dass unterhalb etwa der «Energie» 200 die Anzahl Punkte pro «Energie»-Intervall abnimmt. Eine statistische Analyse ergab, dass diese Abnahme regelmässig erfolgt, also beispielsweise für eine geeignete Intervallgrösse um immer den Faktor 2. Eine solche Verteilung nennt man Exponentialverteilung

oder in der Thermodynamik auch Boltzmann-Verteilung. Deshalb nannte Hinton sein neuronales Modell «Boltzmann-Maschine». Auch die Moleküle in der Erdatmosphäre gehorchen annähernd einer Boltzmann-Verteilung, die auch in vielen anderen Gebieten der Physik eine zentrale Rolle spielt.

Die roten Punkte waren vor dem Training auch Teil der blauen «Wolke» und unterschieden sich in keiner Art und Weise von ihnen. Man hätte beliebige andere 24 Punkte auswählen und die Matrix auf diese trainieren können!

Erstaunlicherweise entsteht durch die Aufspaltung nach der «Energie» von selbst eine Klassierung der trainierten Symbole in einzelne Gruppen. Weit weg von allen anderen Symbolen ist das Prozentzeichen %, das von seiner Struktur her am



Abb. 9: «Mona Lisa working with laptop computer» war meine Eingabe auf <http://huggingface.com> beim KI-Computer FLUX-Pro Unlimited (Nihal Gazi). Das Bild wurde in 15 Sekunden erzeugt. Diese Fälschung ist so offensichtlich, dass sie kaum jemand als Beweis für Computertechnologie im 16. Jh. benutzen würde.

wenigsten zu den anderen passt. Im Gegensatz dazu liegen **I** und **T** sehr nahe beieinander (man vergleiche ihre Struktur in Abb. 5). **N** und **W**, die miteinander verwechselt werden, liegen sogar auf demselben «Energieniveau». Das Beispiel legt nahe, wie ein neuronales Netz fähig ist, autonom Gruppierungen zu erzeugen.

Rekonstruiert man die 2400 zufälligen Vektoren mit Hilfe unserer trainierten Gewichtsmatrix mit je 3 Umläufen, erhält man das in Abb. 8 dargestellte Bild. Die vorher in einer Boltzmann-verteilten Wolke angeordneten blauen Punkte befinden sich nun alle nahe bei den «Energieniveaus» der roten Symbole. Dieses Bild macht klar, weshalb ein neuronales Netz nach einem Training beispielsweise mit Portraits von Menschen neue Portraits «kreieren» kann, die so etwas wie Mischungen von allen trainierten Portraits sind.

Damit wird auch deutlich, wie KI arbeitet: Würde man mit Hilfe eines Zufallszahlengenerators farbige Pixel erzeugen, würde mit einer äusserst kleinen Wahrscheinlichkeit (so alle Millionen Jahre einmal) ein ansprechendes menschliches Portrait erscheinen, d.h. es läge praktisch nur Chaos vor. Lässt man jedoch zufällige Pixelvektoren viele Male durch eine mit Portraits trainierte Matrix komprimieren und expandieren, werden die chaotischen Vektoren

den trainierten angeglichen wie in Abb. 8 gezeigt. Je nach der gewählten Anzahl Zyklen gleichen die erzeugten Bilder stärker oder schwächer den Vorbildern, was dann als kleinere oder grössere «Kreativität» interpretiert werden kann.

### KI kann Halluzinationen entwickeln

Nachdem man gesehen hat, wie KI aus Zufallsvektoren Portraits erzeugen kann, begreift man auch, wie KI benutzt werden könnte, um UFO-Beobachtungen zu «beweisen». Man würde ein neuronales Netz mit allen zur Verfügung stehenden vermeintlichen UFO-Beobachtungen trainieren und dann an eine Kamera anschliessen, die nachts permanent den Himmel absucht. Mit geeignetem Standort würde es nicht lange dauern, bis die KI die Beobachtung von UFOs meldet und als «Beweis» recht überzeugende Bilder präsentieren würde.

Leute, die den vorangehenden Abschnitt verstanden haben, könnten durch solche Bilder nicht überzeugt werden, andere hingegen schon. Dieses Beispiel soll zeigen, wie wichtig es in Zukunft sein wird, einige Funktionalitäten der KI zu verstehen. Zur Illustration des oben skizzierten Verfahrens zum «Beweis» von UFOs zeige ich als Abb. 9 eine offensichtliche Fälschung.

Umgekehrt könnte man aus Resultaten der KI auch Eigenschaften unserer eigenen Gehirne besser verstehen. Wir wissen, dass Menschen Halluzinationen entwickeln können und die KI-Modelle geben uns eine einfache Erklärung, wie dieses Phänomen in neuronalen Netzen entstehen kann. Vielleicht müssen wir den Standpunkt einnehmen, dass Spukgeschichten, Hexen, Verschwörungstheorien, UFO-Beobachtungen und noch Vieles mehr zu erwartende Fehlleistungen menschlicher Hirne sind.

Fritz Gassmann

#### Literatur

Hinton G. E. 2002. Training Products of Experts by Minimizing Contrastive Divergence. *Neural Computation* 14: 1771 - 1800.

Hinton G. E. 2014. Boltzmann Machines. *Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining*. Springer Science+Business Media New York.

# Schweizer Talente auf dem Sprung nach Dubai

Im vergangenen April fand an der ETH Zürich die Finalwoche der Schweizerischen Chemieolympiade (SwissChO) statt. Die vier jungen Goldmedaillengewinnerinnen und -gewinner (zwei davon aus Zürich) haben sich damit für die internationale Chemieolympiade (IChO) qualifiziert, welche jedes Jahr in einem anderen Land stattfindet und dieses Jahr vom 5. bis 14. Juli in den Arabischen Emiraten über die Bühne gehen wird. Ruben Locher, Stanisław Bektaş, Carl-Philipp Cachej und Maya Post werden unser Land an diesem inspirierenden Anlass vertreten und sich mit den besten Chemie-Talenten der Welt messen.

Heute ist es für die Schweiz selbstverständlich, an der internationalen Chemie-Olympiade teilzunehmen. Das war nicht immer so, wie der Bericht von Maurice Cosandey aufzeigt. Als Initiator des allerersten Schweizer Teams und langjähriger Präsident der Schweizer Chemieolympiade hat er die Anfänge der Chemieolympiade miterlebt und unmittelbar erfahren, wie schwierig es war, die Schweiz zu einer Teilnahme zu bewegen. Der originale Bericht ist in englischer Sprache geschrieben und wird in unserem Onlinearchiv neben dieser gekürzten Bearbeitung abrufbar sein.

## Geburt im Prager Frühling

Die Internationale Chemieolympiade (IChO) hatte ihren sehr politischen Ursprung im Jahr 1968 in Prag. Europa war durch den Eisernen Vorhang in zwei Blöcke geteilt und die Bevölkerung der Tschechoslowakei hatte gerade versucht, aus dem sowjetisch regierten Ostblock auszubrechen: eine Reformperiode, die als Prager Frühling in die Geschichte einging und nach wenigen Monaten

von Truppen des Warschauer Paktes brutal niedergeschlagen wurde. Doch eine Gruppe tschechischer Wissenschaftler beschloss, den Prager Geist aufrechtzuerhalten und einen internationalen Wettbewerb für Gymnasiastinnen und Gymnasiasten aus allen östlichen Ländern ausser der UdSSR ins Leben zu rufen. Sie nannten diesen Wettbewerb «Olympiade». Die erste Ausgabe wurde 1968 in Prag durchgeführt, gefolgt von Kattowitz 1969 und Budapest 1970.

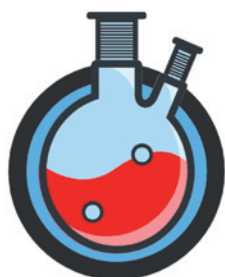
Diese Veranstaltungen waren ein dermassen grosser Erfolg, dass das Zentralkomitee in Moskau davon Wind bekam und die Weiterführung 1971 untersagte. Doch das löste im Ostblock grosse Proteste aus, so dass das Zentralkomitee seine Meinung änderte und beschloss, die nächste Olympiade in Russland zu organisieren: Moskau 1972.

## Die Olympiade wird blockübergreifend ... und wir?

Nach Sofia 1973 wurde die Olympiade 1974 von Rumänien organisiert. Damals beschloss Rumäniens Diktator Ceaușescu, Delegationen aus neutralen Ländern wie Österreich, Schweden und der Schweiz einzuladen. Delegationen aus den beiden erst genannten nahmen teil und belegten die beiden letzten Plätze in der Gesamtwertung – ein Triumph für den Ostblock. Österreich und Schweden erkannten, dass ihre Teams vor der Olympiade trainiert werden mussten, und gewannen im darauffolgenden Jahr ihre ersten Medaillen. 1980 fand die erste Chemieolympiade im Westen statt – Linz in Österreich.

Dass die Schweiz mehrere Jahre lang nicht teilnahm, lag darin begründet, dass hier schlichtweg keiner von den wiederholten Einladungen wusste. Die offiziellen Einladungsschreiben waren an die jeweiligen Bildungsministerien geschickt worden. Da Bildung bei uns aber kantonal geregelt ist, gab es kein solches Ministerium und die Einladungen gingen über zehn Jahre lang auf einem Berner Bürotisch «verloren».

1985 schliesslich beschloss ein inspirierter Angestellter in Bern, diesen Einladungsbrief an die Schweizerische Vereinigung der NaturwissenschaftslehrerInnen (VSN) zu schicken. Ich erinnere



**CHEMISTRY.  
OLYMPIAD.CH**

CHEMIE-OLYMPIADE  
OLYMPIADES DE CHIMIE  
OLIMPIADI DELLA CHIMICA



Sie vertreten als Gewinnerin und Gewinner der Schweizer Chemieolympiade unser Land an der internationalen Chemieolympiade: v.l.o.n.r.u.: Ruben Locher (Berufsfachschule Oberwallis), Stanisław Bektas (International School of Schaffhausen), Carl-Philipp Cachej (MNG Rämibühl, ZH) und Maya Post (Kantonsschule Hohe Promenade, ZH). (Bild: SwissChO)

mich an das Treffen, bei dem der Präsident uns im VSN-Komitee den Einladungsbrief und das Angebot vorlas, einen Beobachter zur nächsten Olympiade 1986 nach Leiden in den Niederlanden zu schicken. Ich war der Einzige, der diese Einladung annahm und war begeistert von dem, was ich sah.

### Ist die Schweiz zu kompliziert?

Zurück in der Schweiz schlug ich dem VSN-Komitee vor, ein Schweizer Team zu gründen und es zur Chemieolympiade 1987 nach Ungarn zu schicken – niemand war interessiert. Die Schweiz sei wegen ihrer Kantone zu kompliziert aufgestellt. Von der *Commission Romande de Chimie* erhielt ich darauf die gleiche Reaktion. Ich sollte es zuerst in meinem ei-

genen Kanton versuchen. Aber auch in meinem Kanton, der Waadt, interessierte sich niemand für dieses Anliegen.

Also trat ich vor meine eigene Klasse im Gymnase de Chamblandes und zeigte auf vier meiner Schüler: «Du, du, du und du! Ihr werdet das Schweizer Team bei der nächsten Chemieolympiade 1987.» Wir fuhren mit dem Nachtzug nach Ungarn, wohin 26 Nationen je vier Schüler geschickt hatten, insgesamt 102 Delegierte. Und die Platzierung meiner Schüler? 96, 100, 101 und 102!

Pierre-Alain Ruffieux – einer dieser vier Pioniere – blieb der Chemieolympiade über viele Jahre verbunden und war anfangs 2020er-Jahre CEO der Firma Lonza in Basel.



Zwei Präsidenten der SwissChO: Links der erste Präsident, Maurice Cosandey, und rechts der amtierende, Fabian Hollinger. (Bild: Science Olympiad)

### Marco Ziegler holt die erste Medaille für die Schweiz

In den Folgejahren stellte ich das Schweizer Team zunächst aus Schülerinnen und Schülern der Romandie und dann aus der ganzen Schweiz zusammen. Kurz darauf initiierte ich die erste Schweizerische Olympische Woche an Ostern – zunächst an meiner Schule, später dann an der EPFL.

Und dann erhielten auch wir endlich unsere erste Medaille! Der ausserordentlich begabte Marco Ziegler aus Sulgen im Thurgau holte 1992 Bronze, 1993 Silber und 1994 nochmal Bronze – beziehungsweise Gold. Er konnte nämlich nachweisen, dass die Prüfungsorganisatoren bei einer Aufgabe einen Fehler gemacht hatten. Er hätte eine Goldmedaille verdient, bekam sie aber aus reglementarischen Gründen nicht zugesprochen.

Als Professor Alex von Zelewsky von der Universität Freiburg von diesem aussergewöhnlichen Ergebnis erfuhr, lud er Marco ein, Chemie in Frei-

burg zu studieren. Dieser durfte sofort mit seiner Doktorarbeit beginnen, ohne davor vier Jahre reguläres Universitätsstudium absolvieren zu müssen.

2003 gründete Dustin Hofstetter die SwissChO und seit 2004 werden in einem zentralen Wettbewerb um die Osterzeit die besten Schweizer Teilnehmenden mit Bronze-, Silber- und Goldmedaillen ausgezeichnet. Die vier Gewinnerinnen und Gewinner der Goldmedaillen bilden jeweils die Nationalmannschaft für die Internationale Olympiade desselben Jahres. Seither gewinnt die Schweiz jedes Jahr durchschnittlich eine internationale Medaille.

Ich selber ging 2002 in den Ruhestand und blieb noch einige Jahre Präsident des Olympischen Komitees. Allerdings verlor ich zunehmend den Kontakt zu den Studierenden und entschied schliesslich, das Olympische Komitee zu verlassen. Ich interessiere mich weiterhin für die Olympiaden, bin aber nicht mehr aktiv daran beteiligt. Für mein En-



Das allererste Schweizer Team im Zug unterwegs zur Internationalen Chemieolympiade in Budapest 1987. (Bild: M. Cosandey)

agement hat mir das derzeitige Komitee der Schweizer Chemieolympiade an seiner letzten Generalversammlung am 26. April 2025 den Titel eines Ehrenmitglieds verliehen.

### Nachwort

Die Zahl der Teilnehmenden der internationalen, wie auch der nationalen Chemieolympiade nimmt jedes Jahr zu. Auch das Komitee der Schweizer Chemieolympiade ist inzwischen auf das Engagement von 20 ehrenamtlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und vielen Sponsoren angewiesen. Die Schweiz organisierte 2023 ihre erste Internationale Chemieolympiade mit 348 Olympioniken aus 89 Nationen unter der Leitung von Professor Wendelin Stark von der ETH Zürich. Er entdeckte nach eigener Aussage seine Leidenschaft für Chemie durch seine Teilnahmen an den Chemieolympiaden 1993 bis 1995. So wie ihm ging und geht es zahlreichen anderen Olympioniken jedes Jahr.

Wissenschaftsolympiaden werden inzwischen in verschiedenen Disziplinen durchgeführt – weltweit unterstützt von unzähligen Lehrerinnen und Lehrern an Gymnasien, Doktorandinnen und Doktoranden, PostDocs und Professorinnen und Professoren während den angebotenen Wochenendkursen an Hochschulen und nicht zuletzt von all den Helferinnen und Helfern an den Wettbewerben selbst. Sie alle schenken mit ihrem Engagement jährlich tausenden Nachwuchsforschenden weltweit Inspiration, Freude und ein Erlebnis, das die Olympioniken ein Leben lang begleitet.

**Maurice Cosandey und René Oetterli**

M.C. war Chemielehrer und präsierte das Komitee der Schweizer Olympiade über viele Jahre. Er ist seit vergangenem April Ehrenmitglied der Schweizer Chemieolympiade.

René Oetterli hat den Text aus dem Englischen übersetzt, leicht bearbeitet und um das Nachwort ergänzt. Er ist selber Chemielehrer am MNG Rämibühl und bietet vertiefende Chemiekurse für Olympioniken an.

Weiterführende Informationen

Webseite der Schweizerischen Chemie-Olympiade: <https://chemistry.olympiad.ch/de/>

Webseite der Internationalen Chemieolympiade 2025 in den Vereinigten Emiraten: [www.icho2025.ae/](http://www.icho2025.ae/)

### Ein langer Weg

Als die 20 Finalist\*innen der Chemie-Olympiade am Ostermontag den Campus Höggerberg der ETH Zürich betraten, hatten sie schon einen langen Weg hinter sich. Zusammen mit rund 800 anderen Jugendlichen hatten sie im Herbst an der ersten Runde des Wettbewerbs teilgenommen und im Januar an der Universität Bern die zweite Runde bestanden. Während mehrerer Vorbereitungswochenenden an der EPFL und den Universitäten Basel und Zürich waren sie weit über den normalen Schulstoff hinaus in ihr Lieblingsfach eingetaucht.

In der Woche nach Ostern fand dann das Finale an der ETH Zürich statt: Drei Tage lang letzte Vorbereitungen, dann am 24. April die praktische und die theoretische Prüfung. Letztere sei dieses Jahr echt schwer gewesen und habe viele mathematische Kenntnisse vorausgesetzt, erzählt die Freiburger Silber-Gewinnerin Jingyao (Nancy) Han.



Leonhard Mayer, Viola von Loesch, Giulio Vogt (Gold) und Niklas Neusuess (Silber) aus dem Fürstentum Liechtenstein.

### Liechtenstein erstmals mit vollständiger Delegation

Liechtensteiner Schüler\*innen dürfen für Auswahl und Vorbereitung an den Schweizer Wissenschafts-Olympiaden teilnehmen, reisen aber als eigene Delegation an internationale Wettbewerbe. Bisher war das Fürstentum an der IChO durch einzelne Schülerinnen und Schüler vertreten. Dieses Jahr nun bilden Giulio Vogt, Leonhard Mayer, David Hasler und Viola von Loesch vom Liechtensteinischen Gymnasium zum ersten Mal eine vierköpfige Delegation.

Die Vierteljahrsschrift (VJS) erscheint viermal jährlich:  
März, Juni, September, Dezember

Herausgeber

Naturforschende Gesellschaft in Zürich NGZH

NGZH-Vorstand

Dr. Fritz Gassmann (Präsident)

Dr. Felix Würsten (Quästor)

Dr. René Oetterli (Soziale Medien)

Dr. Heinzpeter Stucki (Archivar)

Prof. em. Dr. Conradin A. Burga

Nicole Dettwiler (Studierendenvertreterin)

Prof. em. Dr. Rolf Rutishauser

Prof. em. Dr. Martin Schwyzer

Prof. em. Dr. Wilfried Winkler

Prof. Dr. Felix Zelder

Gestaltungskonzept

Barbara Hoffmann

[www.barbara-hoffmann.com](http://www.barbara-hoffmann.com)

Redaktion und Satz

Felix Würsten

Druck

Koprint AG, Alpnach Dorf

Auflage

900

Kontakt

Sekretariat der NGZH

Sekretariat a.i.

Fritz Gassmann

Limmatstrasse 6

5412 Vogelsang

[sekretariat@ngzh.ch](mailto:sekretariat@ngzh.ch)

[redaktion@ngzh.ch](mailto:redaktion@ngzh.ch)

[www.ngzh.ch](http://www.ngzh.ch)

Redaktionsschluss

31. Januar / 30. April

31. Juli / 31. Oktober

ISSN

0042-5672

Nachdruck

Mit Quellenangabe erlaubt

Mit Unterstützung von:



# Ausstellungen

Technorama  
Winterthur

## KLANGWELTEN



Die Sonderausstellung Klangwelten nimmt sich den Klangphänomenen rund um Schall, Resonanz, Rhythmus und Musik an.

Töne sehen, Vibrationen fühlen, Klänge neu erleben, mit allen Sinnen – anfassen und experimentieren ist bei «Klangwelten» erwünscht.

An verschiedenen Stationen werden Themen wie Schall, Resonanz, Rhythmus und Musik konkret erlebbar gemacht und die physikalischen Phänomene dahinter anschaulich erklärt.

Experimentiere mit Mustern und Resonanzen. Ergründe spielerisch, was hinter Klangphänomenen steckt.

Weitere Informationen: <https://explorer.technorama.ch/de/ausstellung/sonderausstellung-klangwelten>

bis Juli 2025

Kulturama, Museum des Menschen  
Englischviertelstrasse 9, Zürich

## ERLEBNISRAUM STEINZEIT

In diesem interaktiven Erlebnisraum können Sie verschiedene Fertigkeiten aus der Steinzeit selbst ausprobieren und dabei die Errungenschaften und Herausforderungen der Steinzeitmenschen erleben.

Lernen Sie, wie unsere Vorfahren mit einfachen Werkzeugen Löcher in Steine bohrten und diese für verschiedene Zwecke nutzten, oder mahlen Sie Getreide mit einem originalen Mahlstein aus der Steinzeit. Erfahren Sie, wie aus Naturmaterialien wie Pflanzenfasern robuste Schnüre und Seile und feine Stoffe hergestellt wurden, und probieren Sie selbst Leder mit einer Knochennadel zu nähen.

Tauchen Sie ein in die faszinierende Welt der Steinzeit und entdecken Sie die handwerklichen Techniken unserer Vorfahren.

Zugang für Kinder ab 6 Jahren unter Aufsicht einer erwachsenen Person.

Weitere Informationen: [www.kulturama.ch/ausstellungen/sonderausstellung/](http://www.kulturama.ch/ausstellungen/sonderausstellung/)

Weitere Daten von Veranstaltungen werden laufend in unserer Agenda auf [www.ngzh.ch](http://www.ngzh.ch) veröffentlicht.

