

Künstliche Intelligenz und (Quanten-)Physik

Florian Marquardt

Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-

Nürnberg



MAX PLANCK INSTITUTE
FOR THE SCIENCE OF LIGHT



(Bild: MPL)



(Bild: Wikipedia)



**FRIEDRICH-ALEXANDER
UNIVERSITÄT
ERLANGEN-NÜRNBERG**

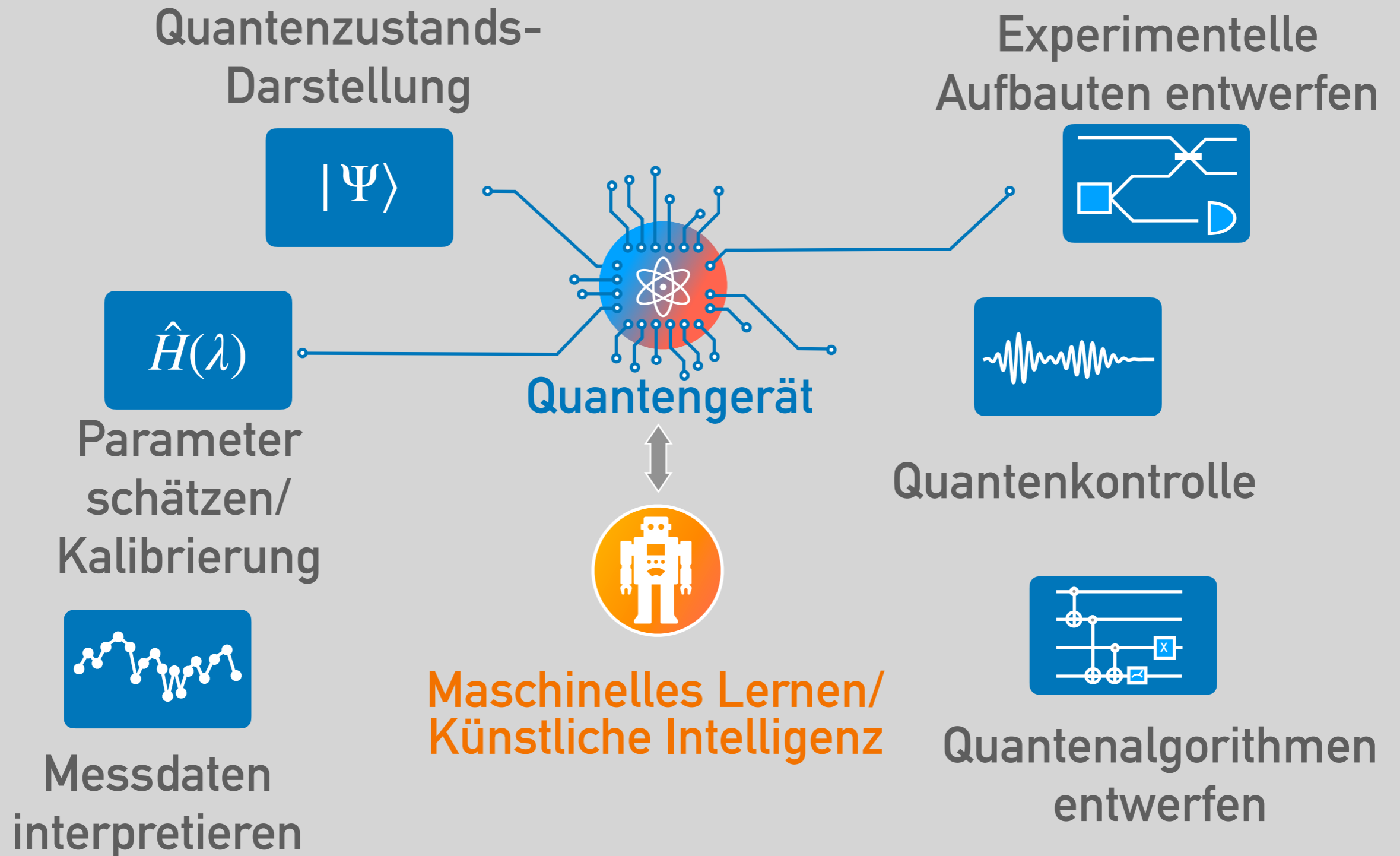
**Künstliche
Intelligenz**

**Quanten-
technologien**

Munich
Quantum
Valley



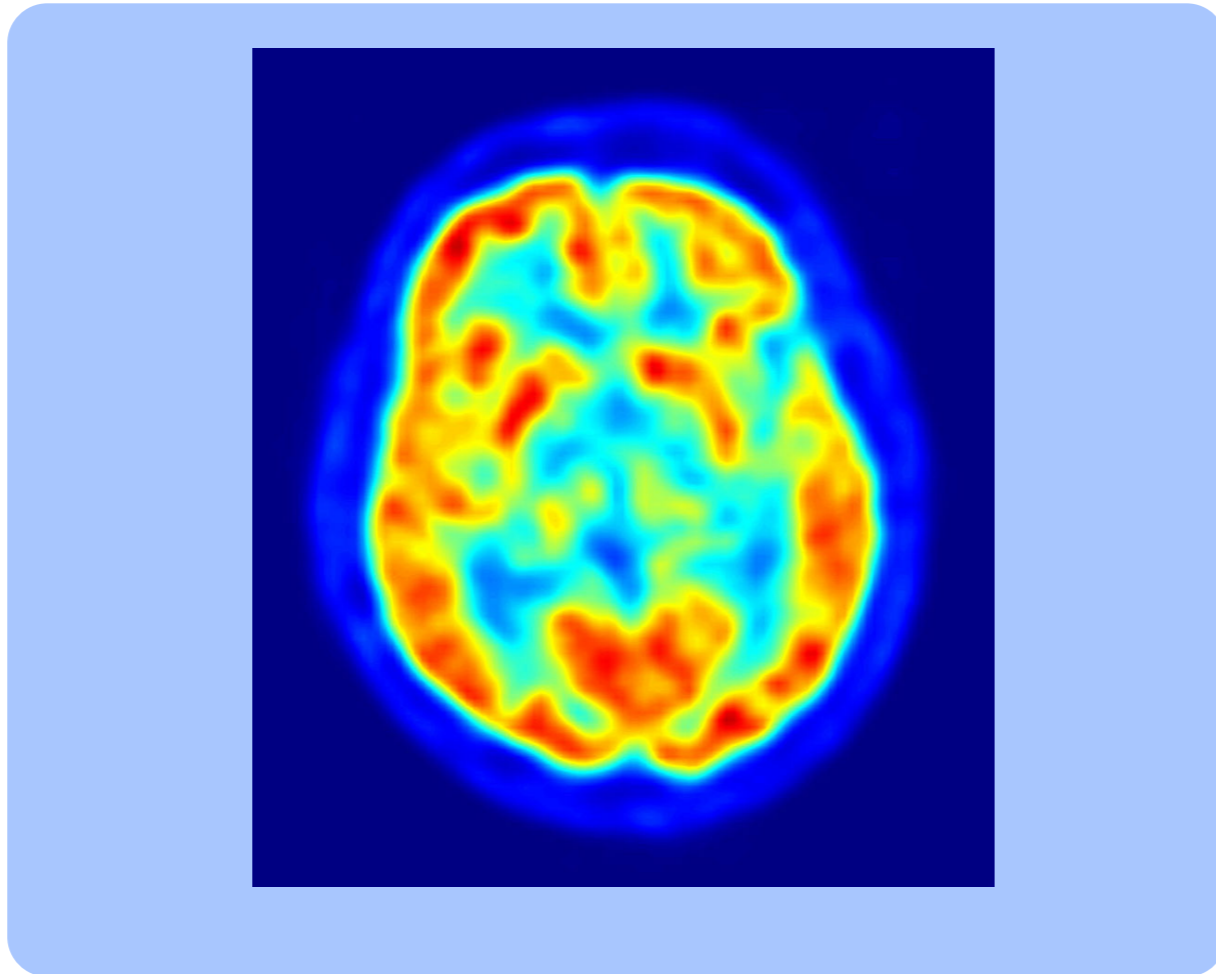
KI für QT



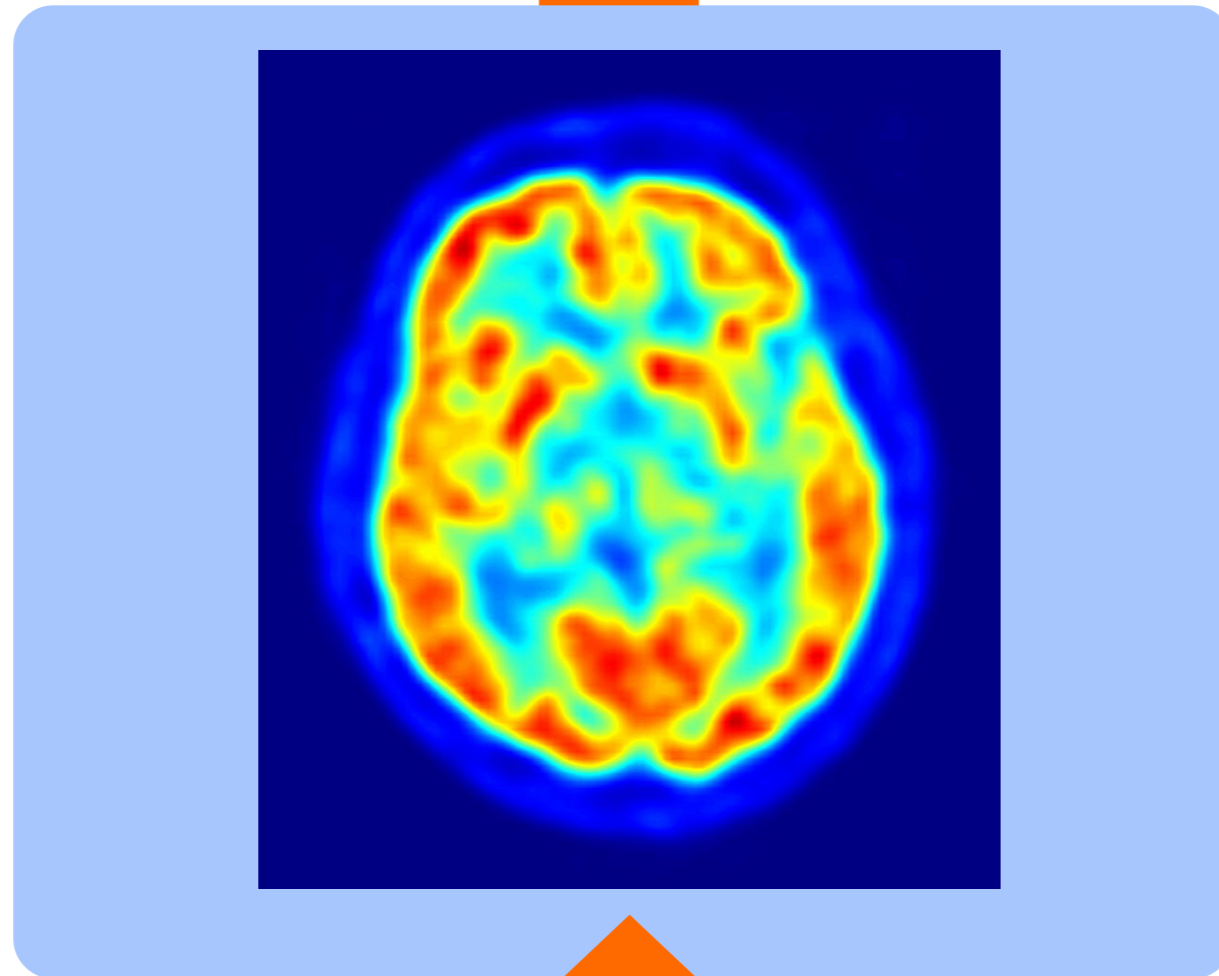
Neuronale Netze

Anwendungen in
Wissenschaft und Physik

Anwendungen für
Quantencomputer

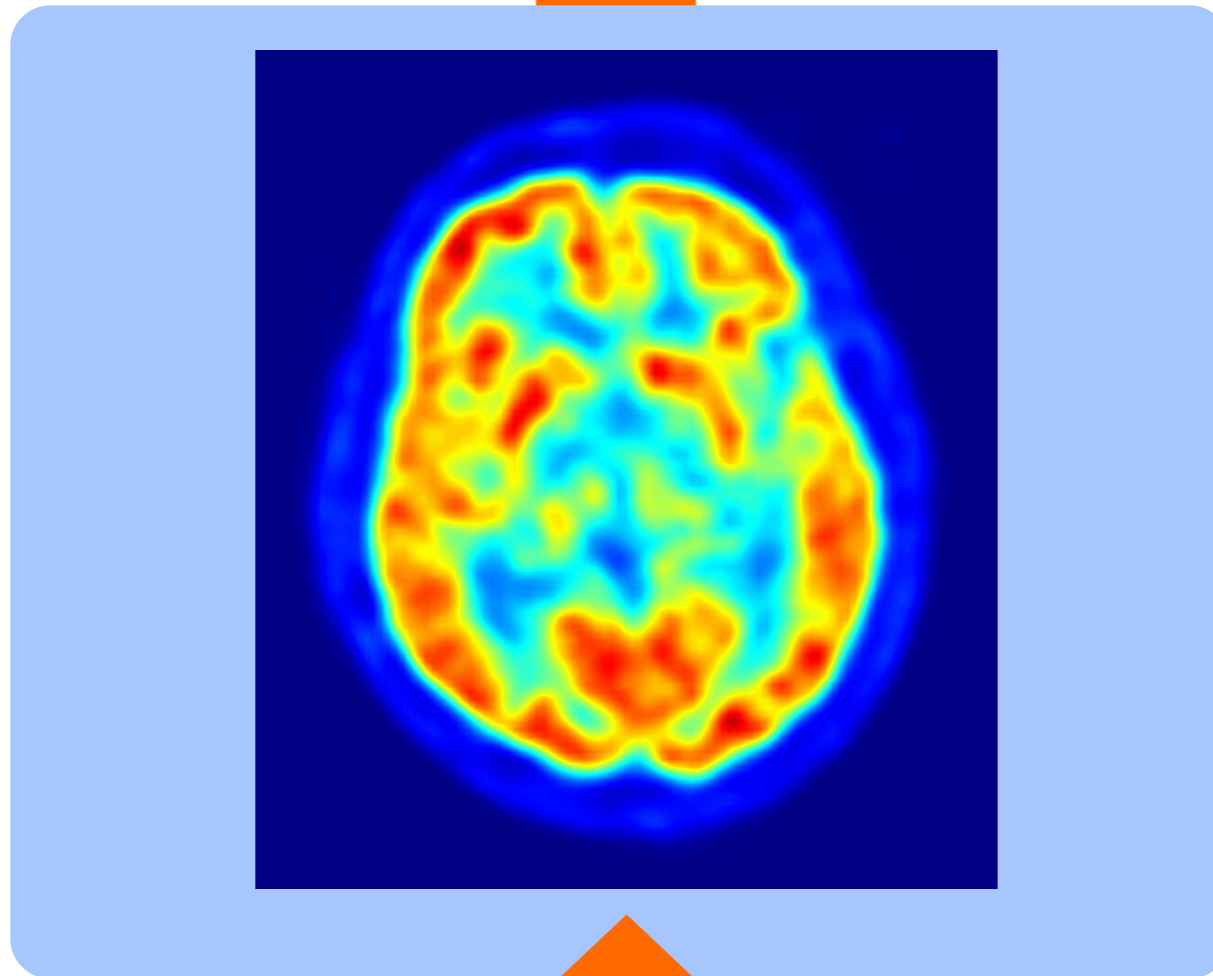


ERGEBNIS



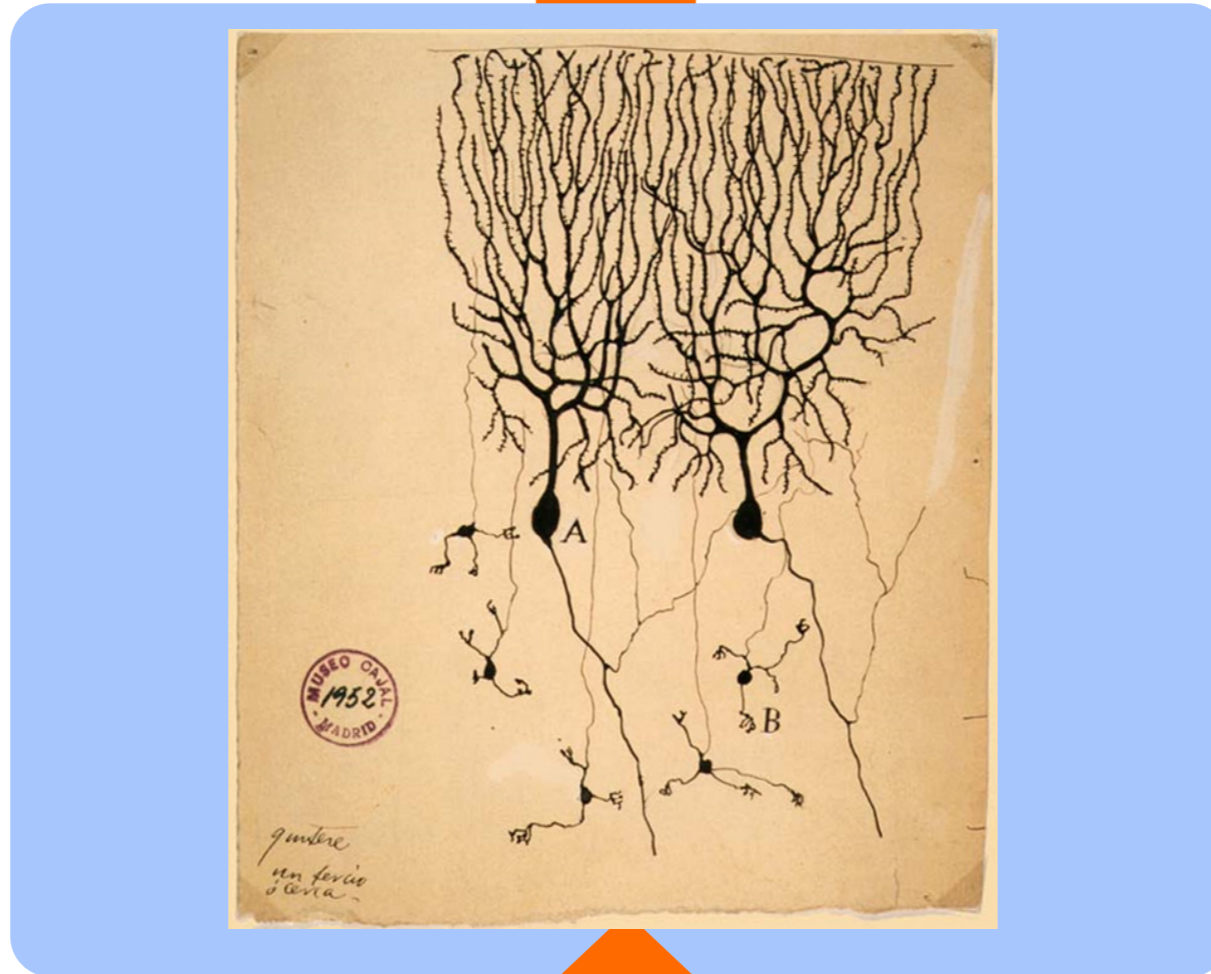
BEOBACHTUNG

"Glühbirne"



(Picture:Wikimedia Commons)

ERGEBNIS



BEOBACHTUNG

(Ramon y Cajal,
~1900)

ERGEBNIS

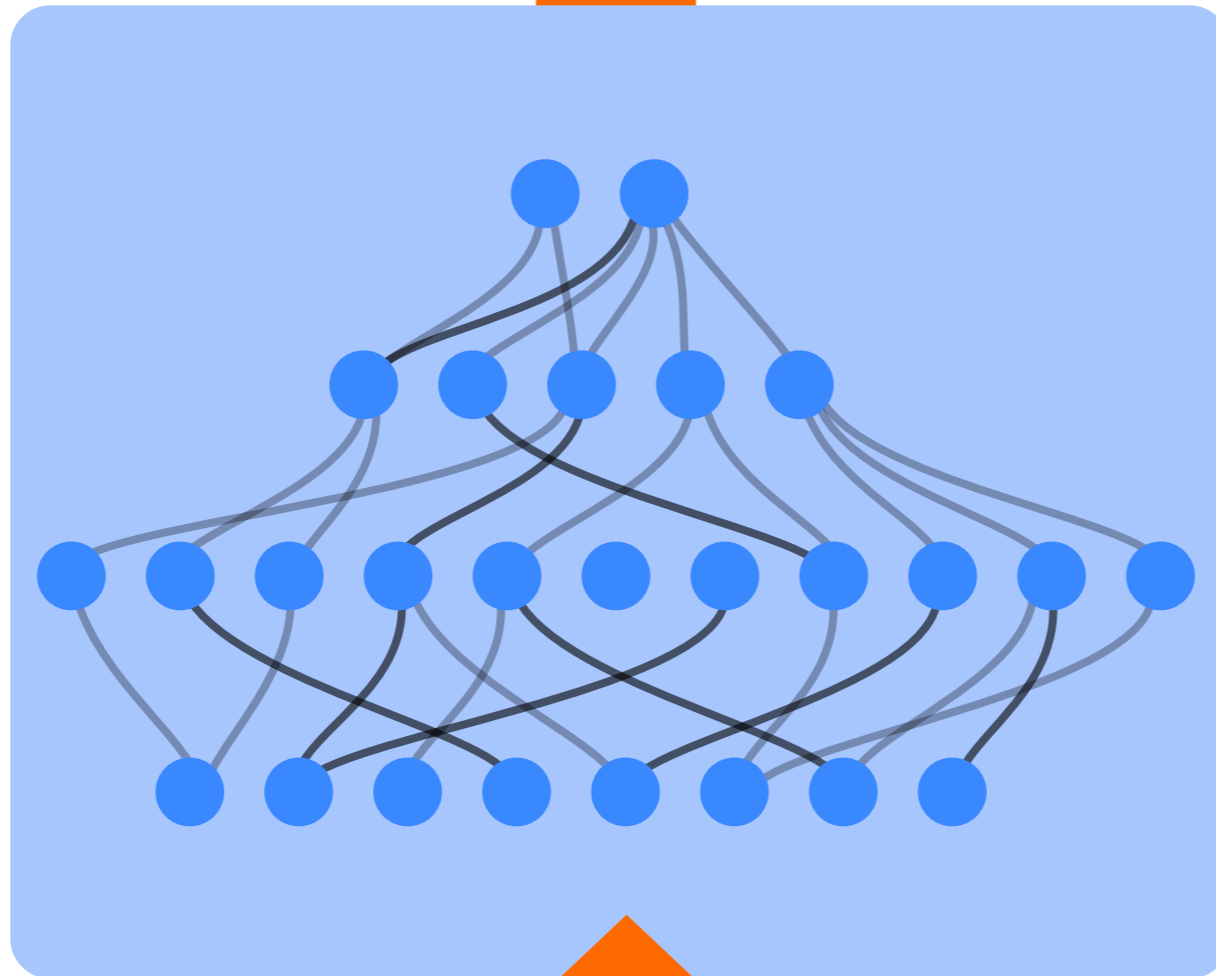


**Künstliches
Neuronales
Netzwerk**



BEOBACHTUNG

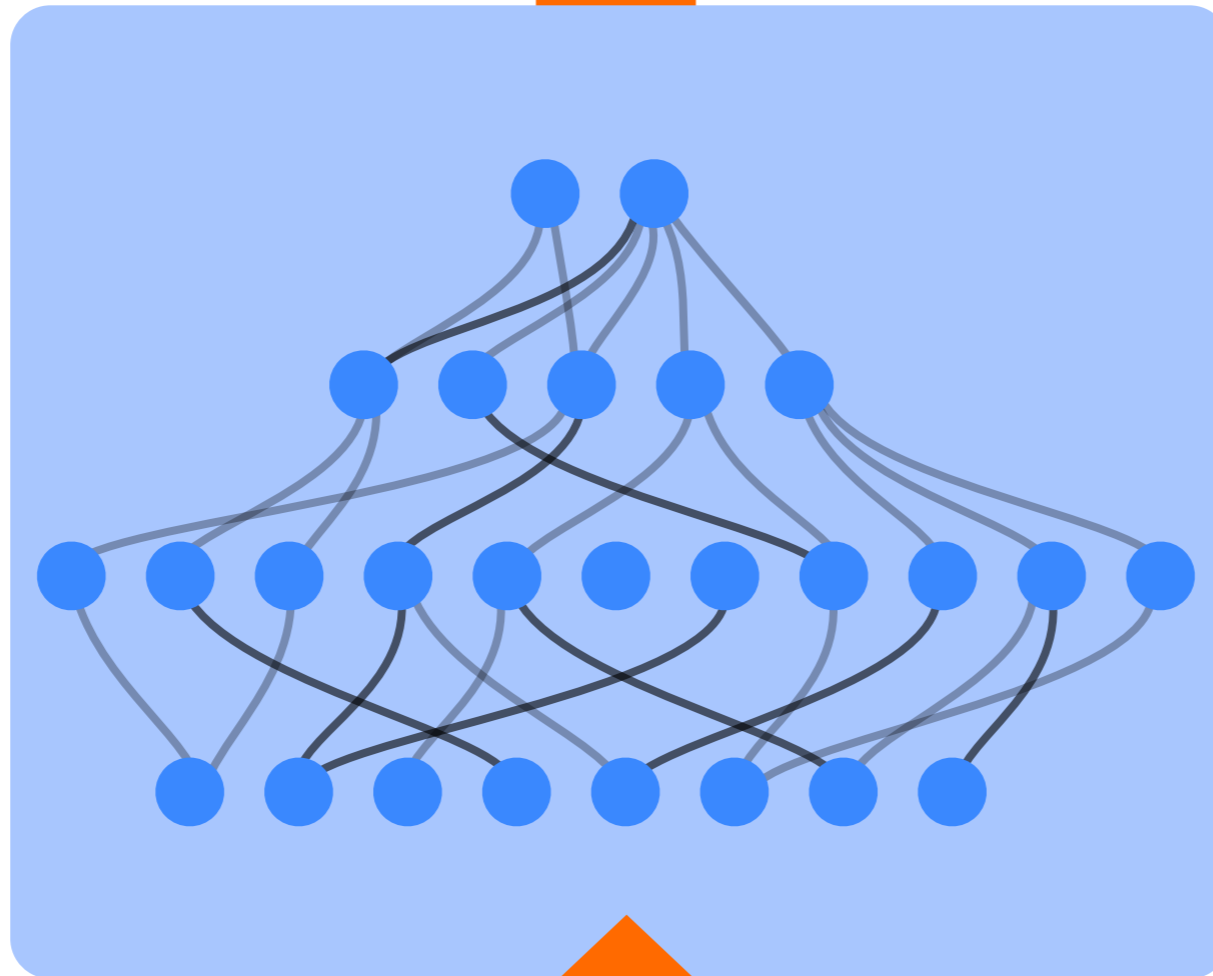
ERGEBNIS



BEOBACHTUNG



"Glühbirne"

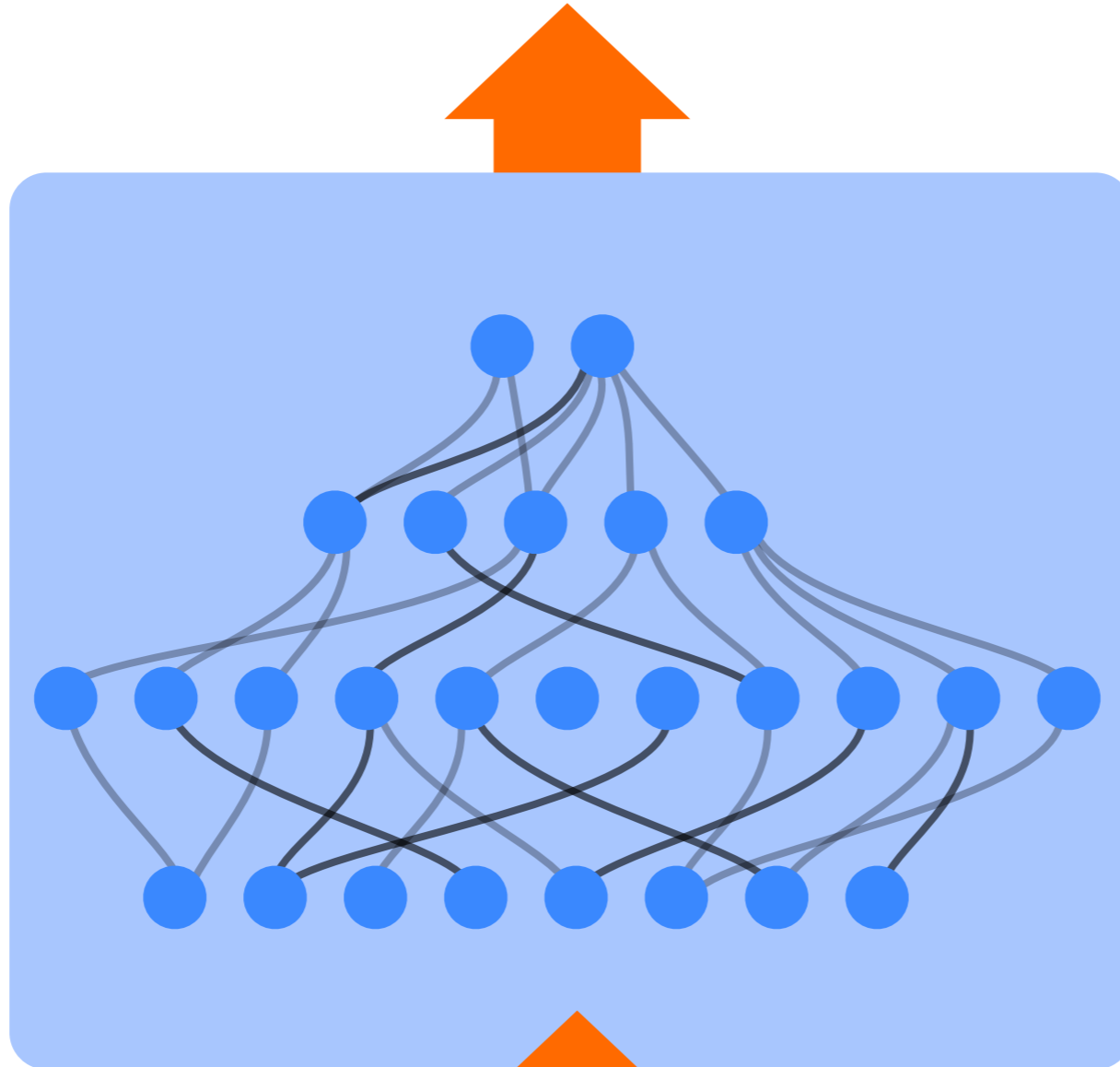


(Trainingsbilder)



(Picture:Wikimedia Commons)

"Glühbirne"



(dieses Bild wurde nie
zuvor vom Netzwerk
gesehen!)

(Picture:Wikimedia Commons)

2012: Ein neuronales Netzwerk schlägt andere Verfahren im "ImageNet" Wettbewerb

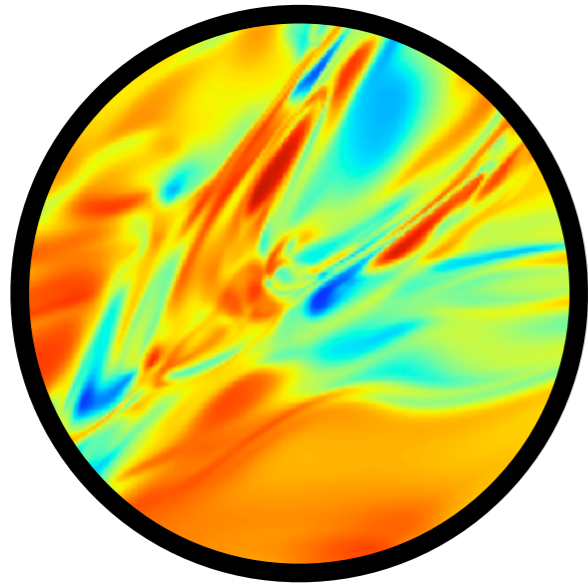


1.2 Millionen Trainingsbilder

Zahlreiche Anwendungen in der Technik:

Spracherkennung, Steuerung von Robotern,
Auswertung von Satellitenbildern, ...

...und in der Wissenschaft!



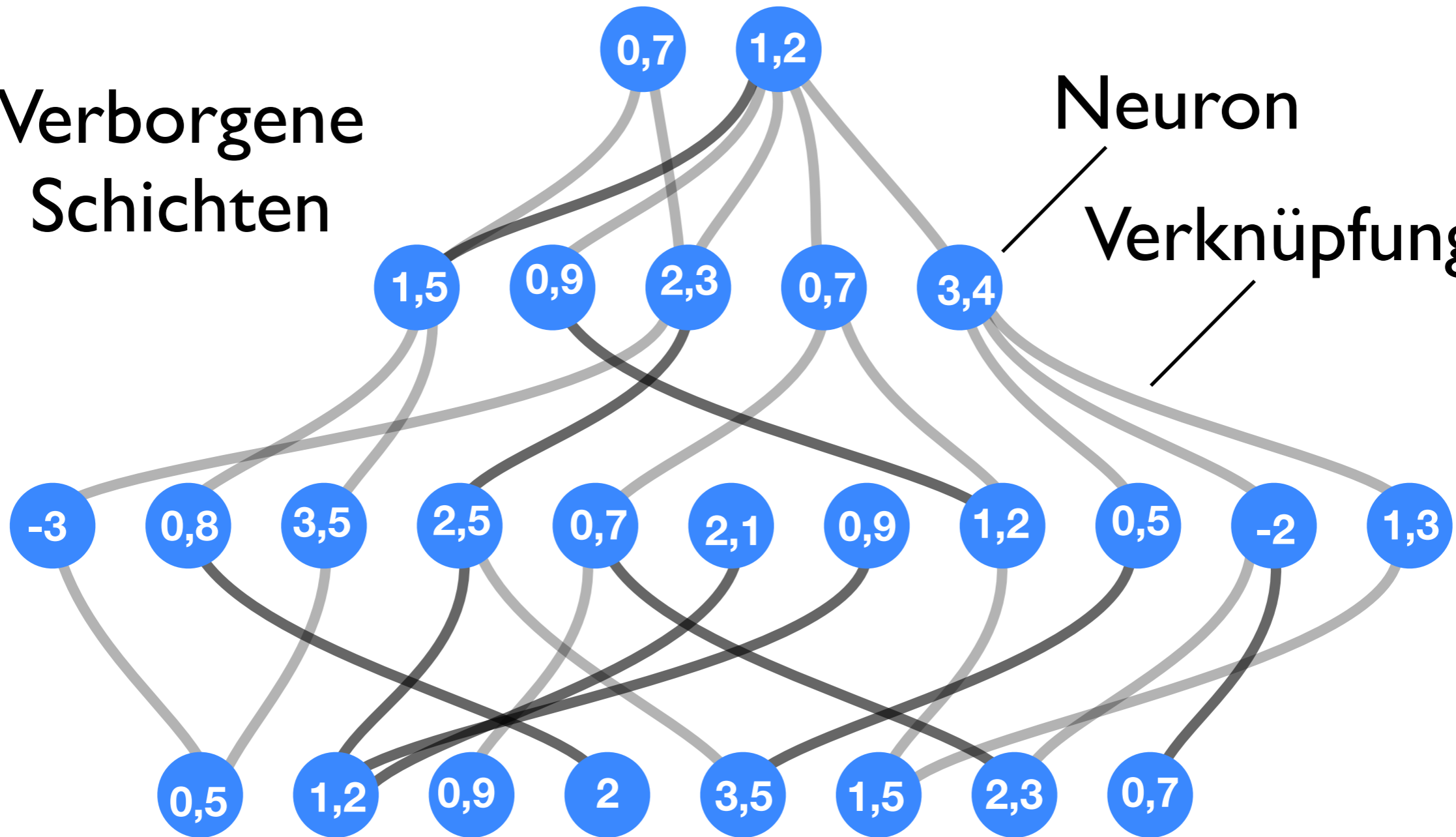
Das Training eines Netzwerks

Ergebnis-Schicht

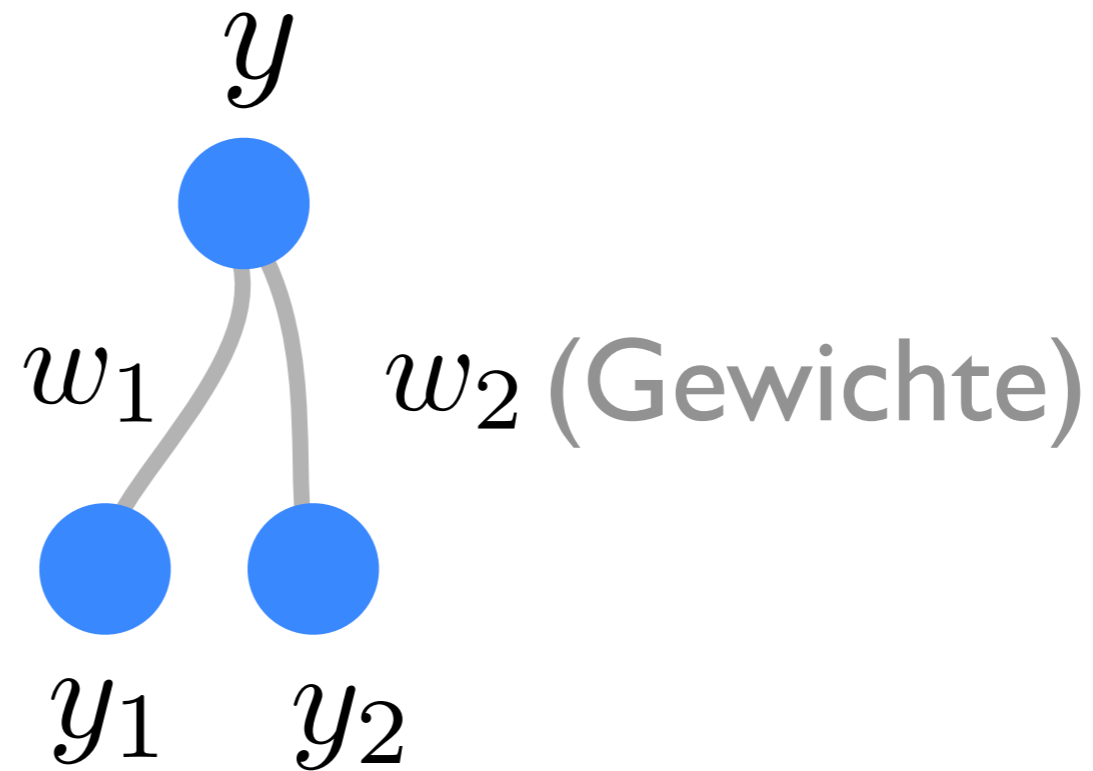
Verborgene
Schichten

Neuron

Verknüpfung



Eingangsschicht

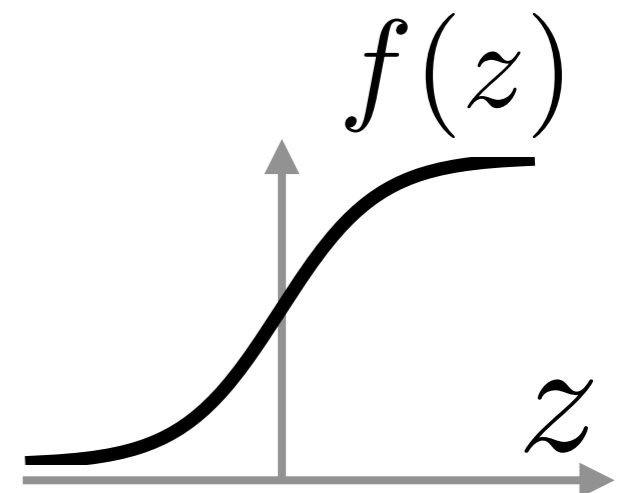


1 Lineare Überlagerung

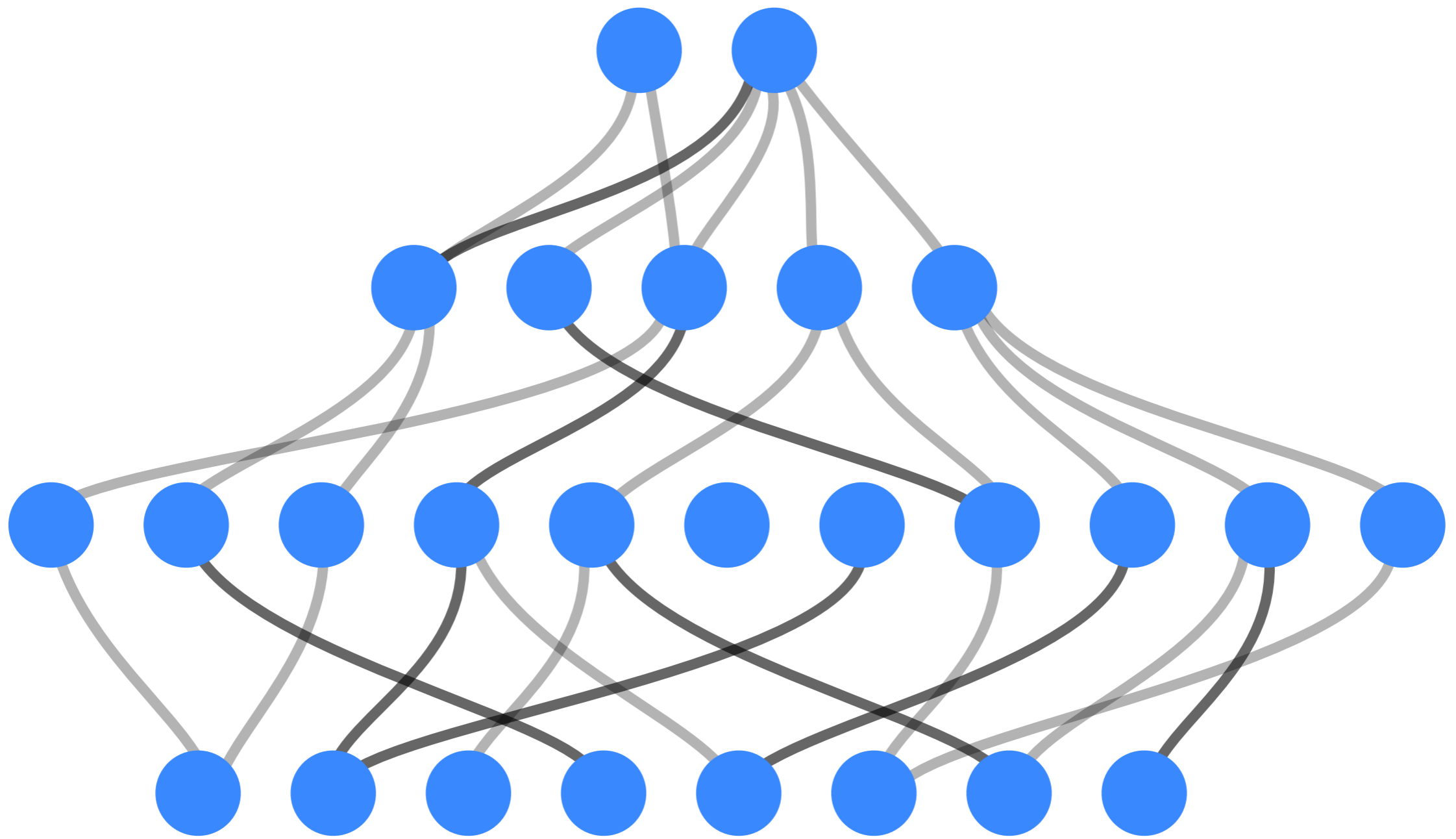
$$z = w_1 y_1 + w_2 y_2 + b$$

2 Nichtlineare Funktion

$$y = f(z)$$

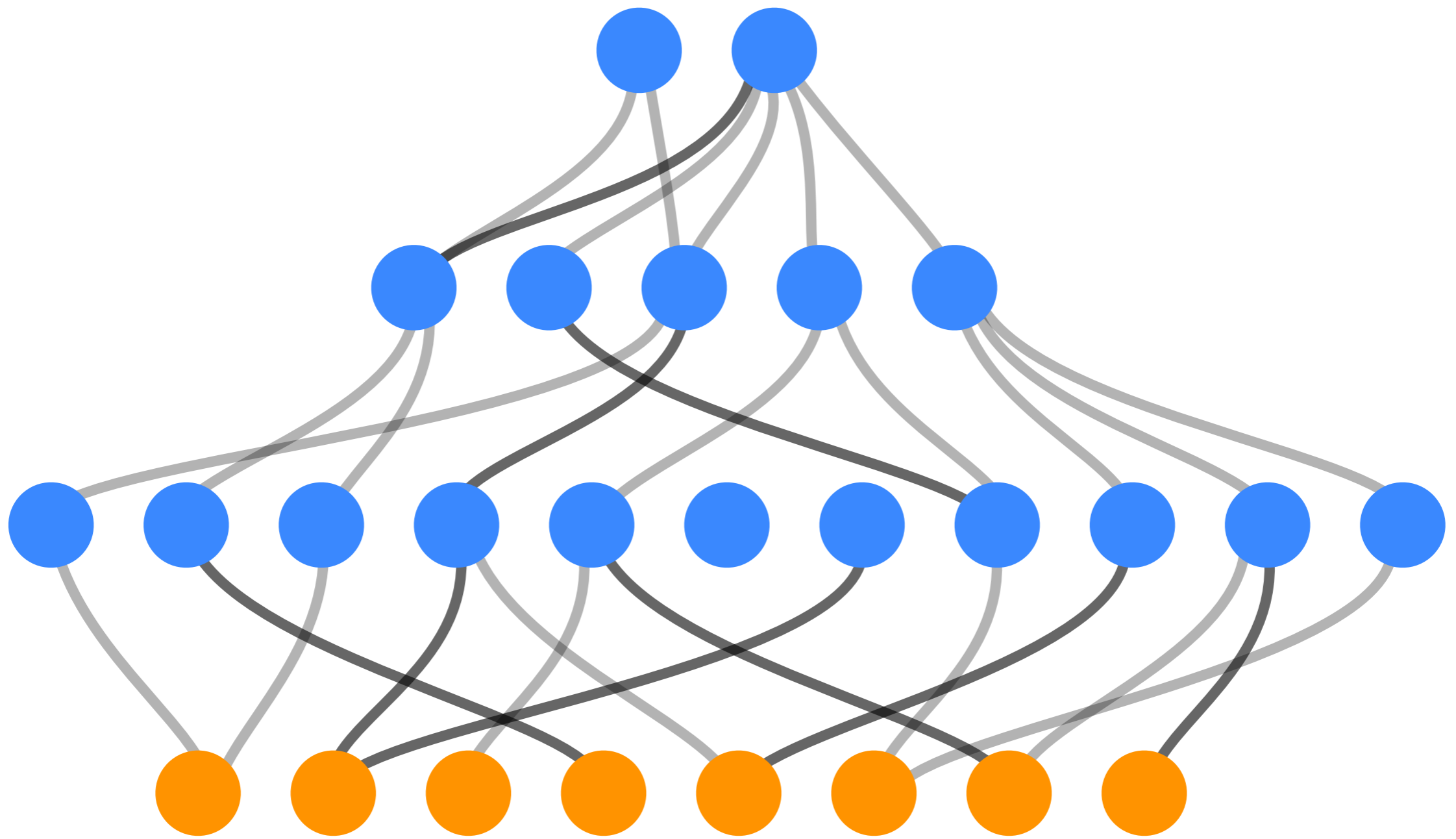


Ergebnis-Schicht



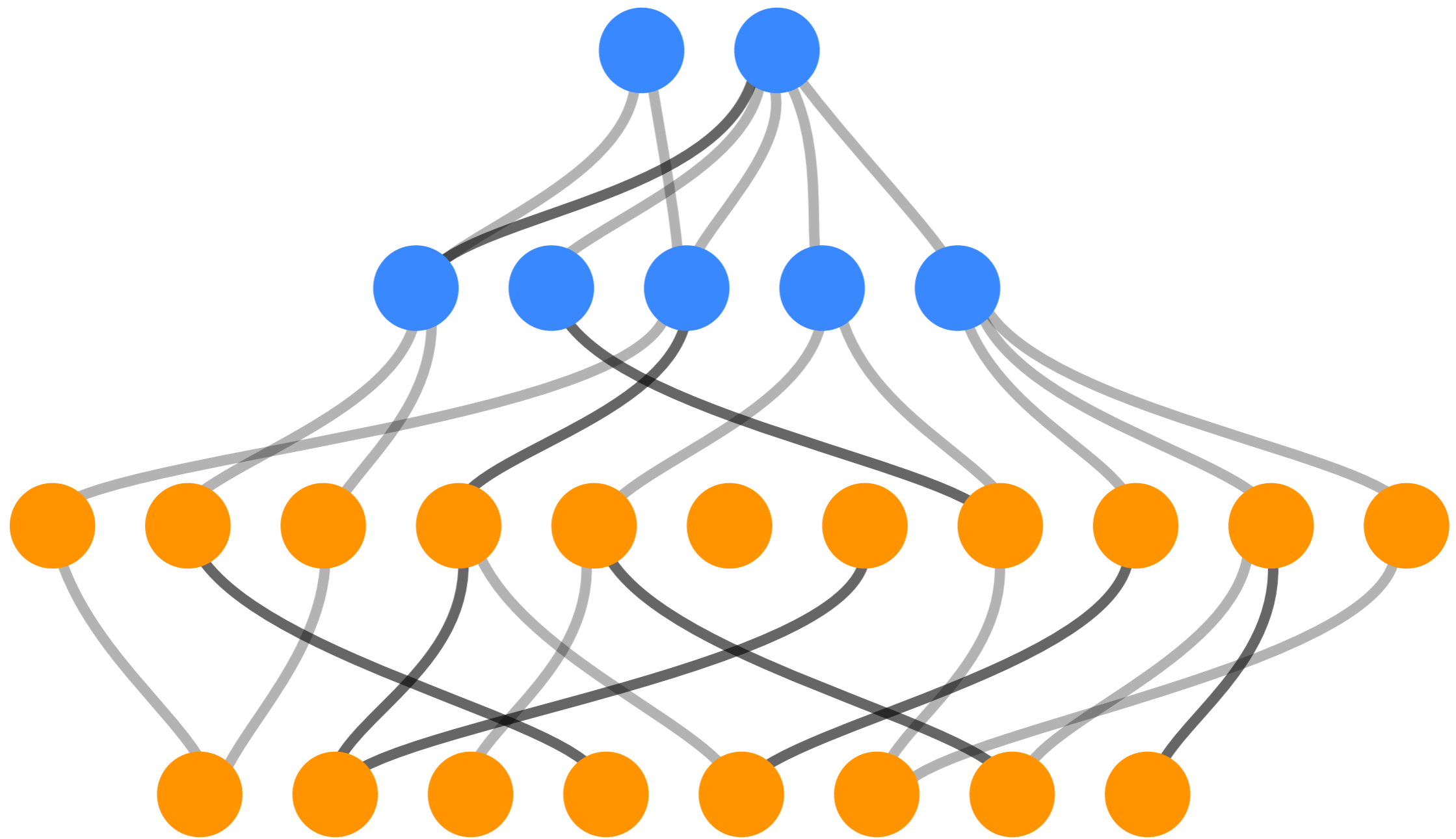
Eingangs-Schicht

Ergebnis-Schicht



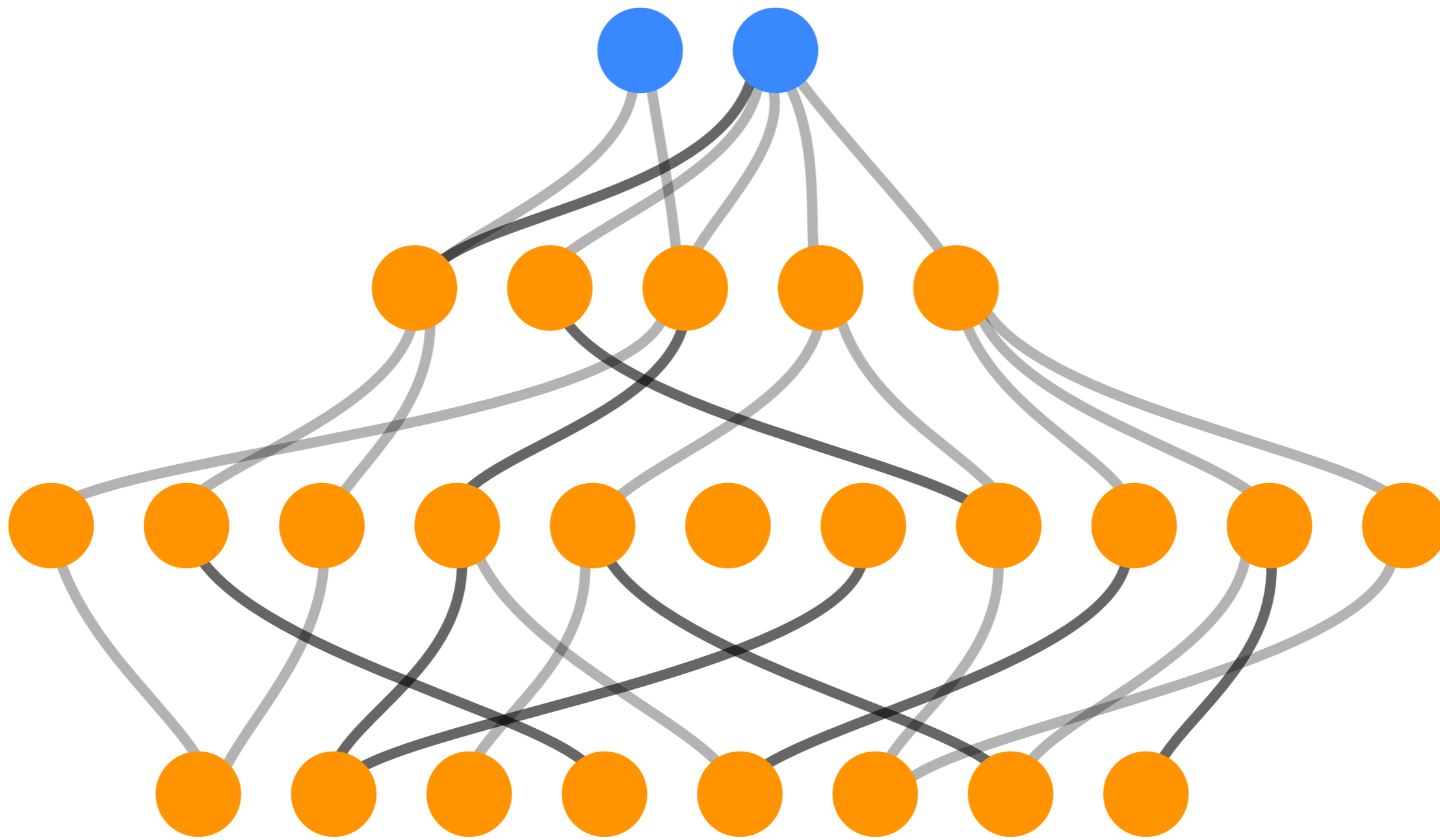
Eingangsschicht

Ergebnis-Schicht



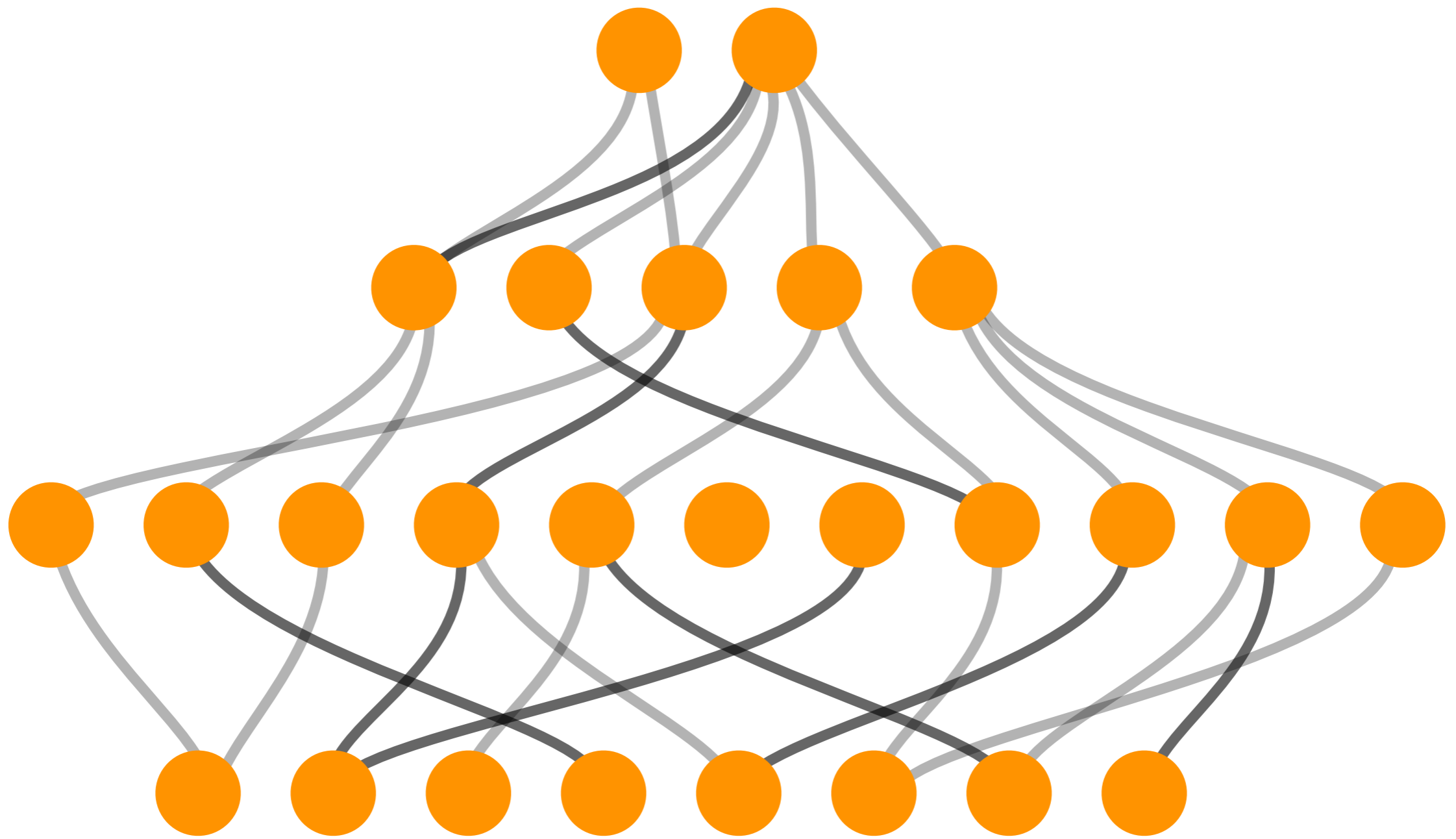
Eingangsschicht

Ergebnis-Schicht



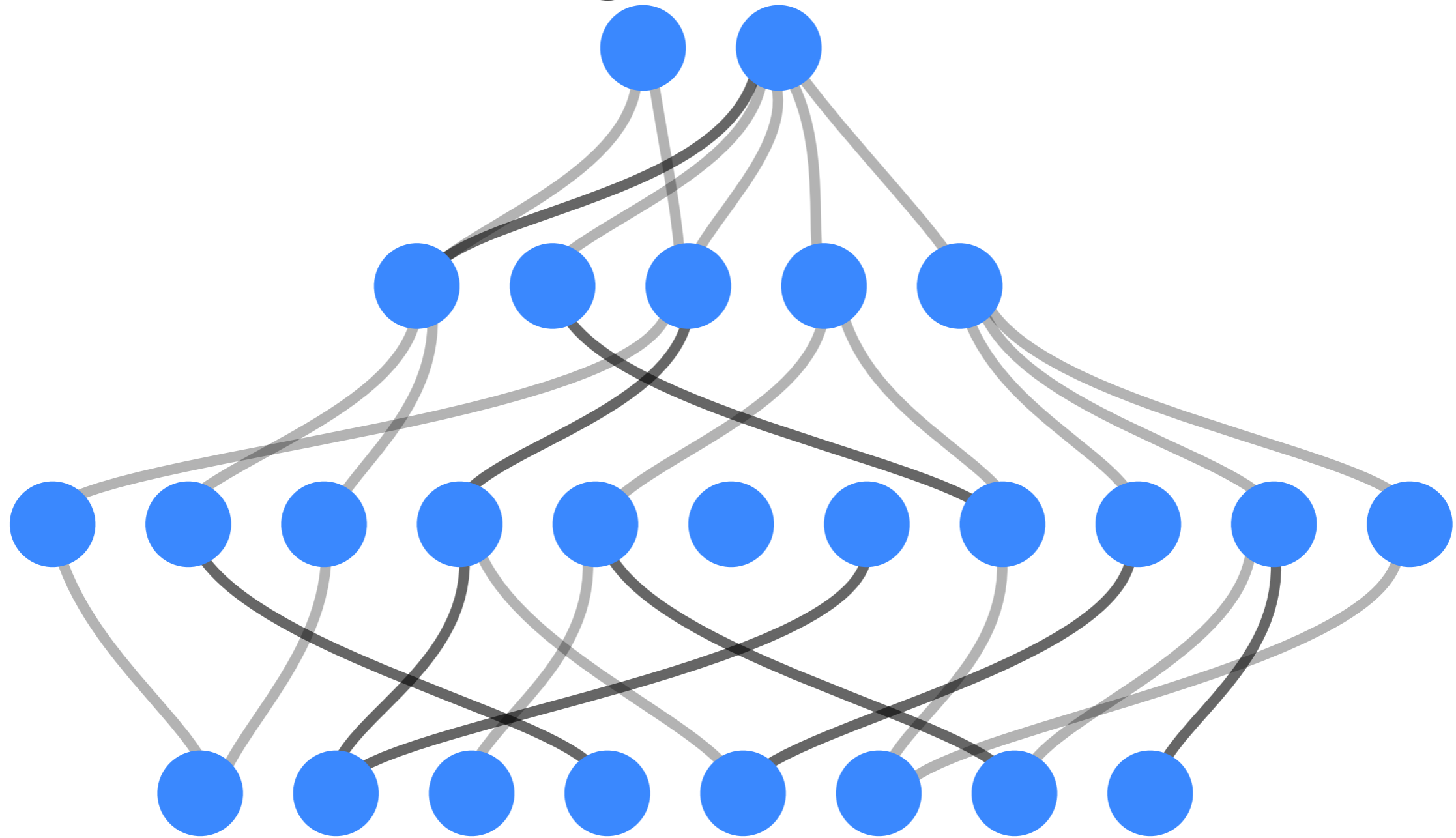
Eingangsschicht

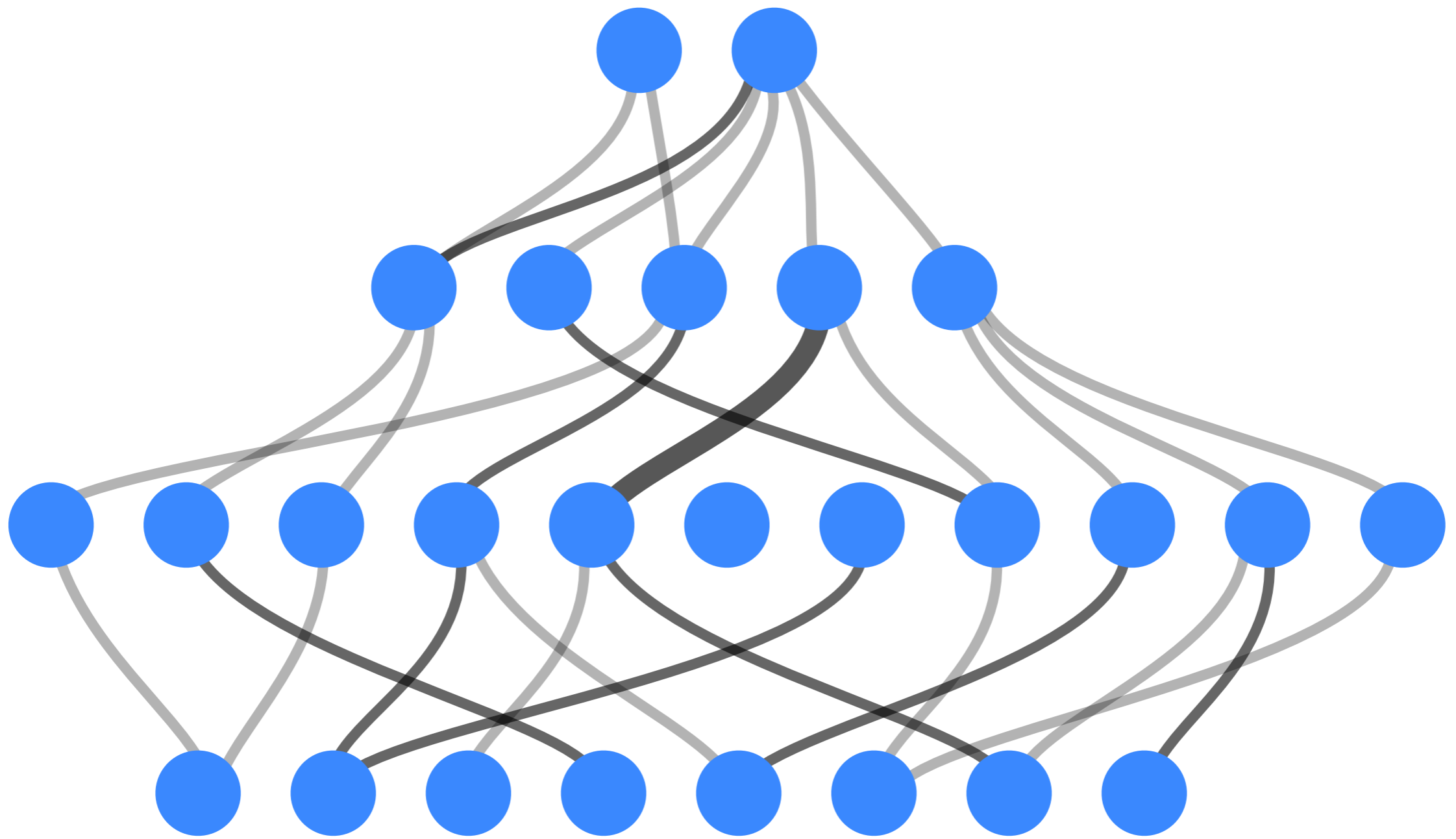
Ergebnis-Schicht

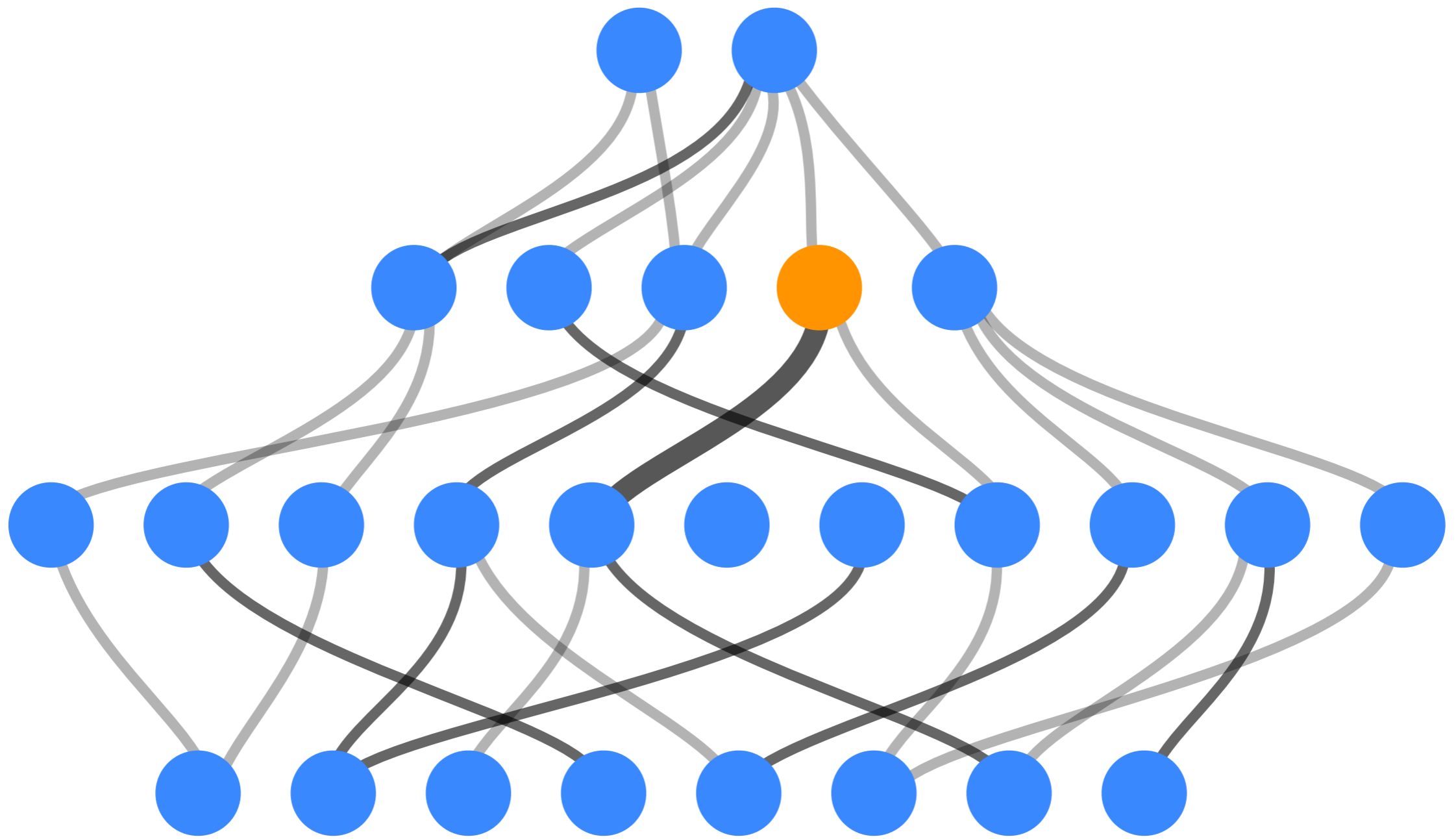


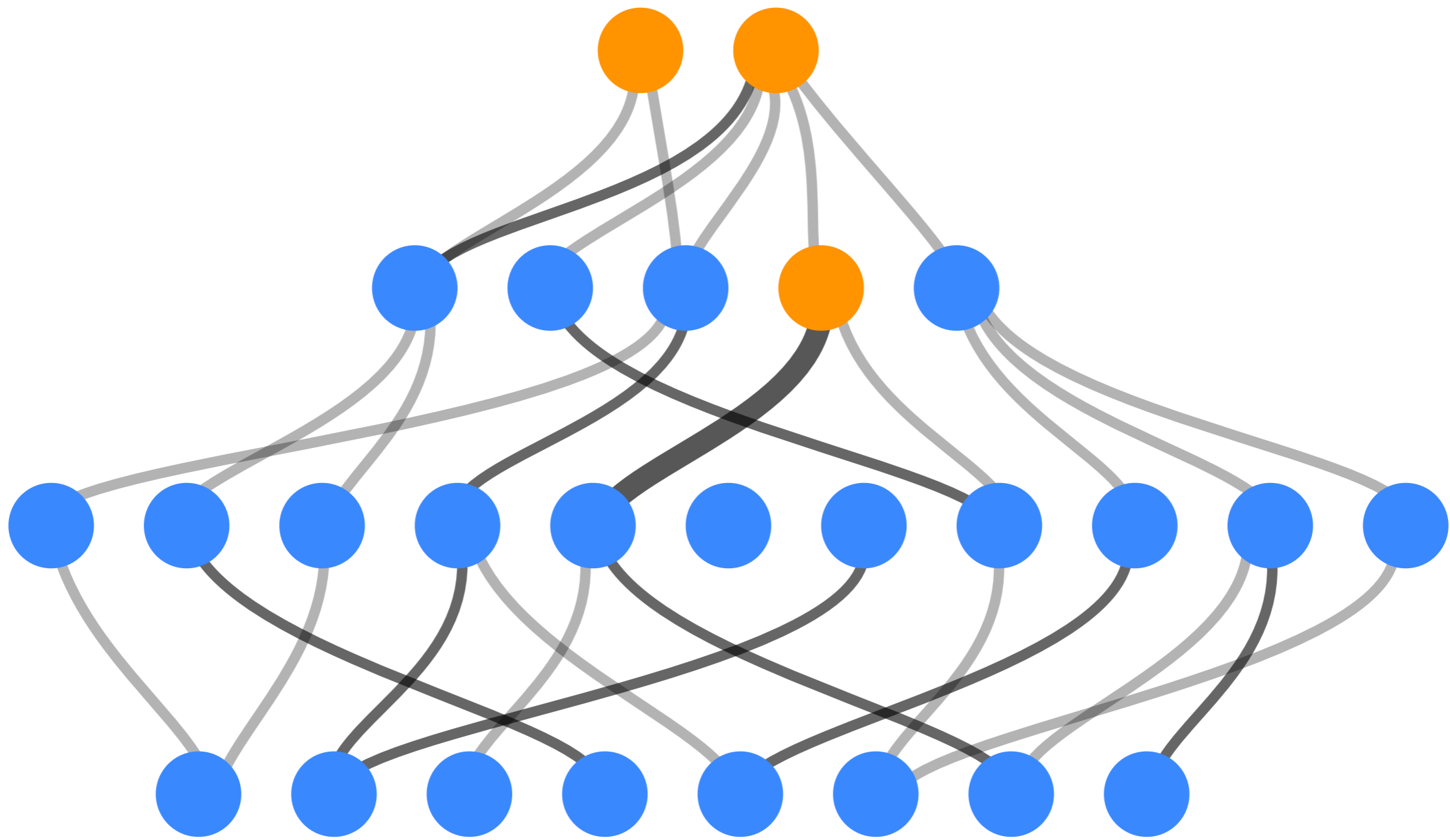
Eingangsschicht

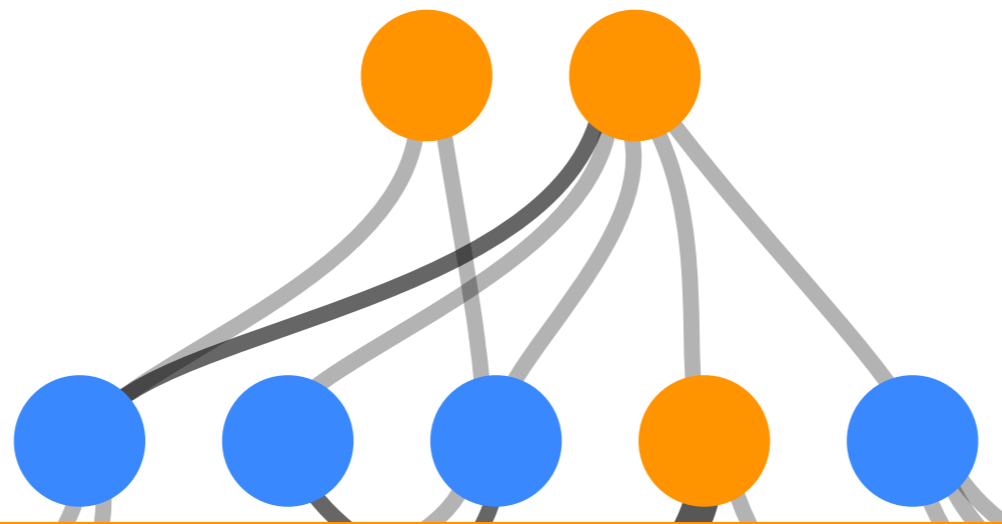
Training: Verändere Stärke der Verknüpfungen, um näher an die "korrekten" Ergebnisse zu kommen!











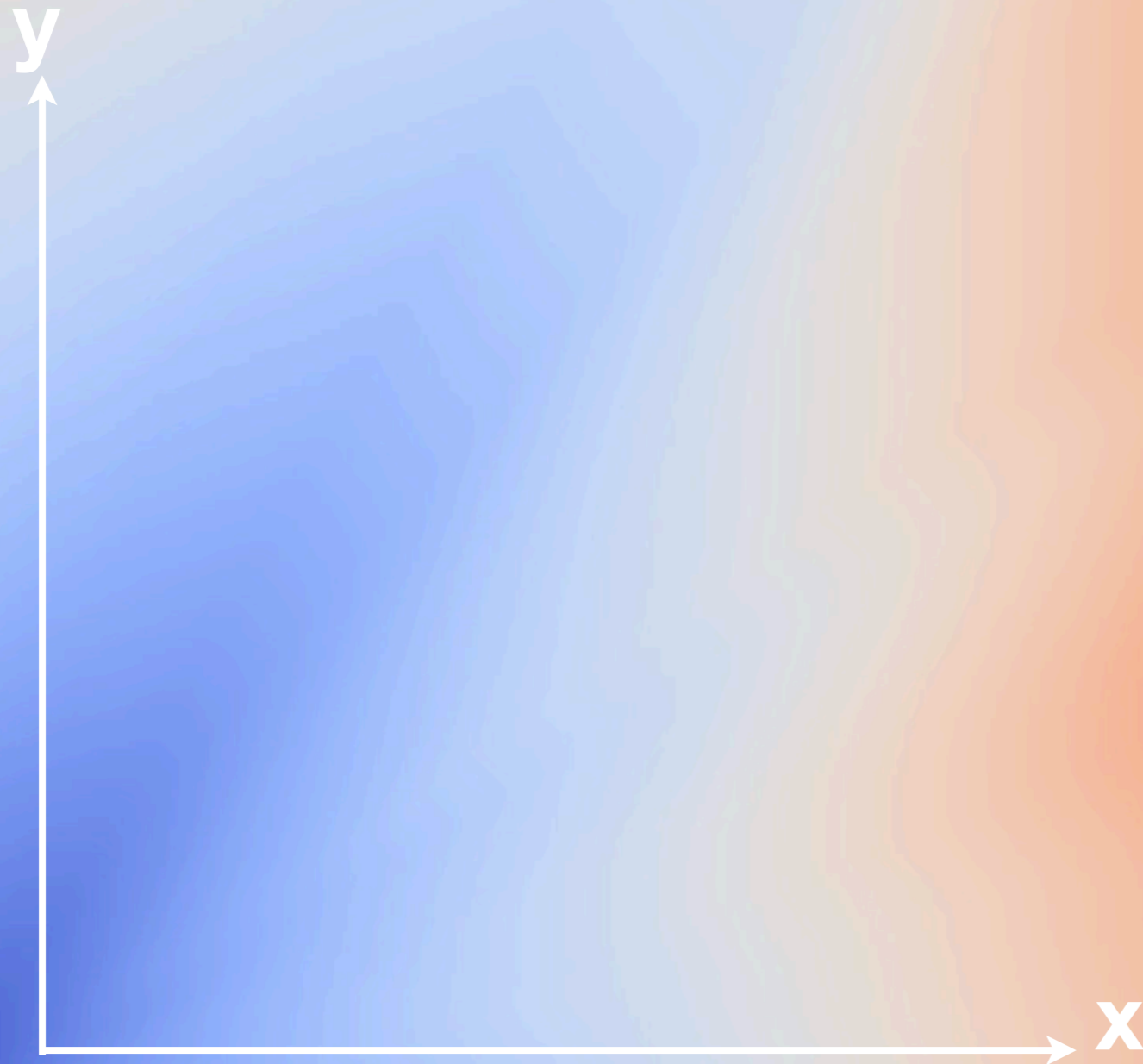
Sehr oft(!), für viele verschiedene Eingangswerte:

1. Netz berechnet Ergebnis
2. die Abweichung vom korrekten Ergebnis wird verkleinert durch Anpassung der Gewichte



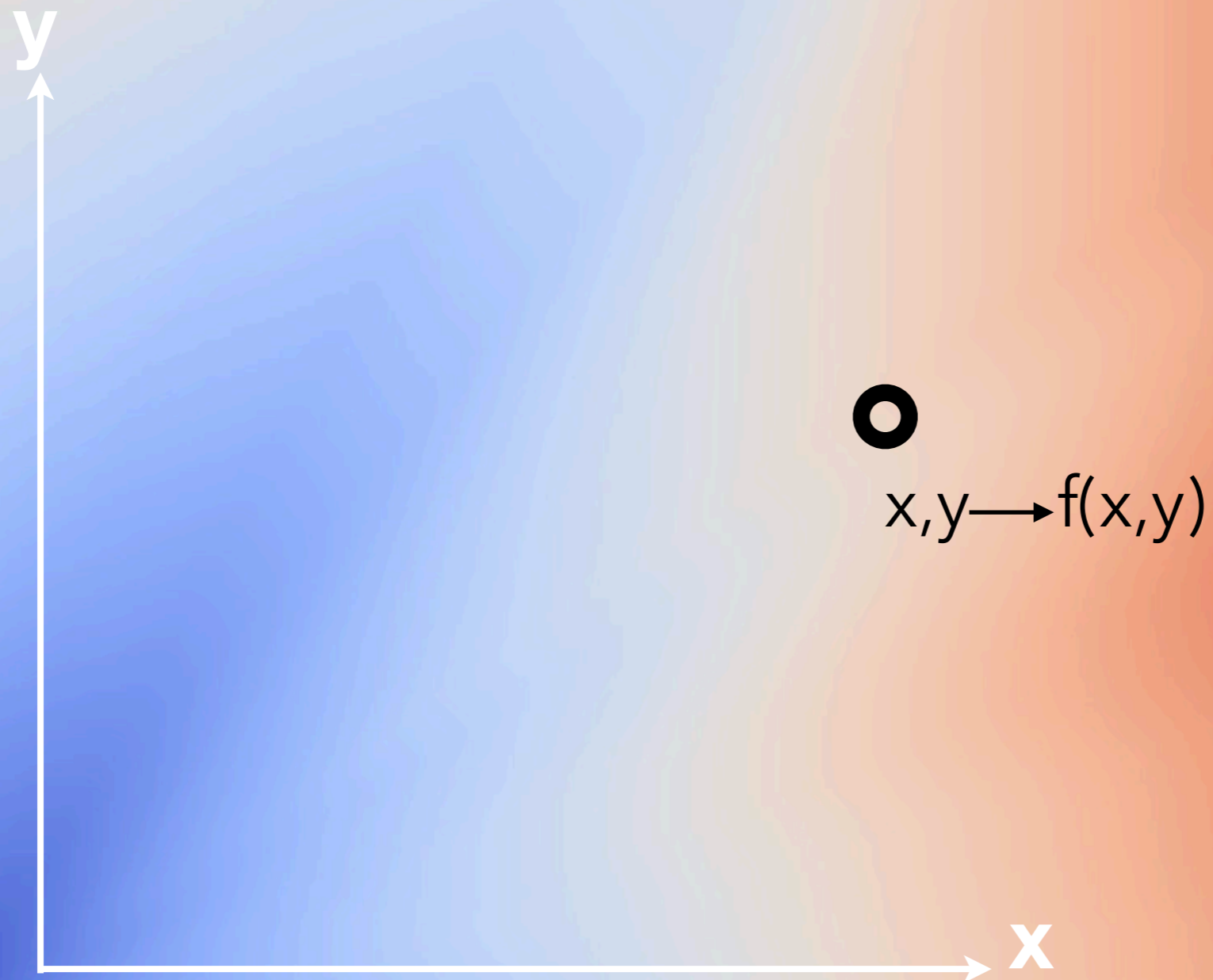
Beispiel: Lernen einer Funktion von 2 Variablen

Farbe=f(x,y)

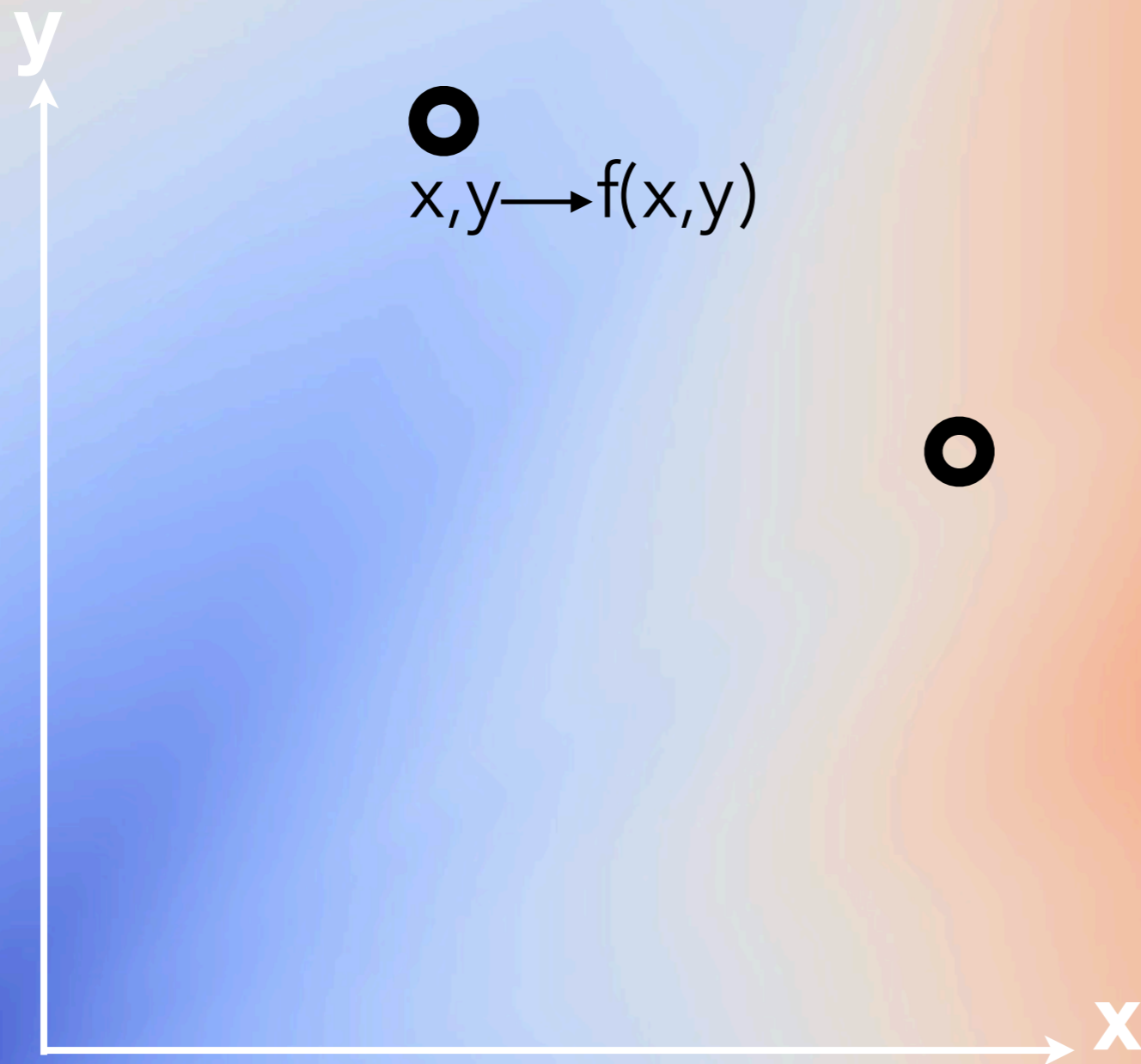


Beispiel: Lernen einer Funktion von 2 Variablen

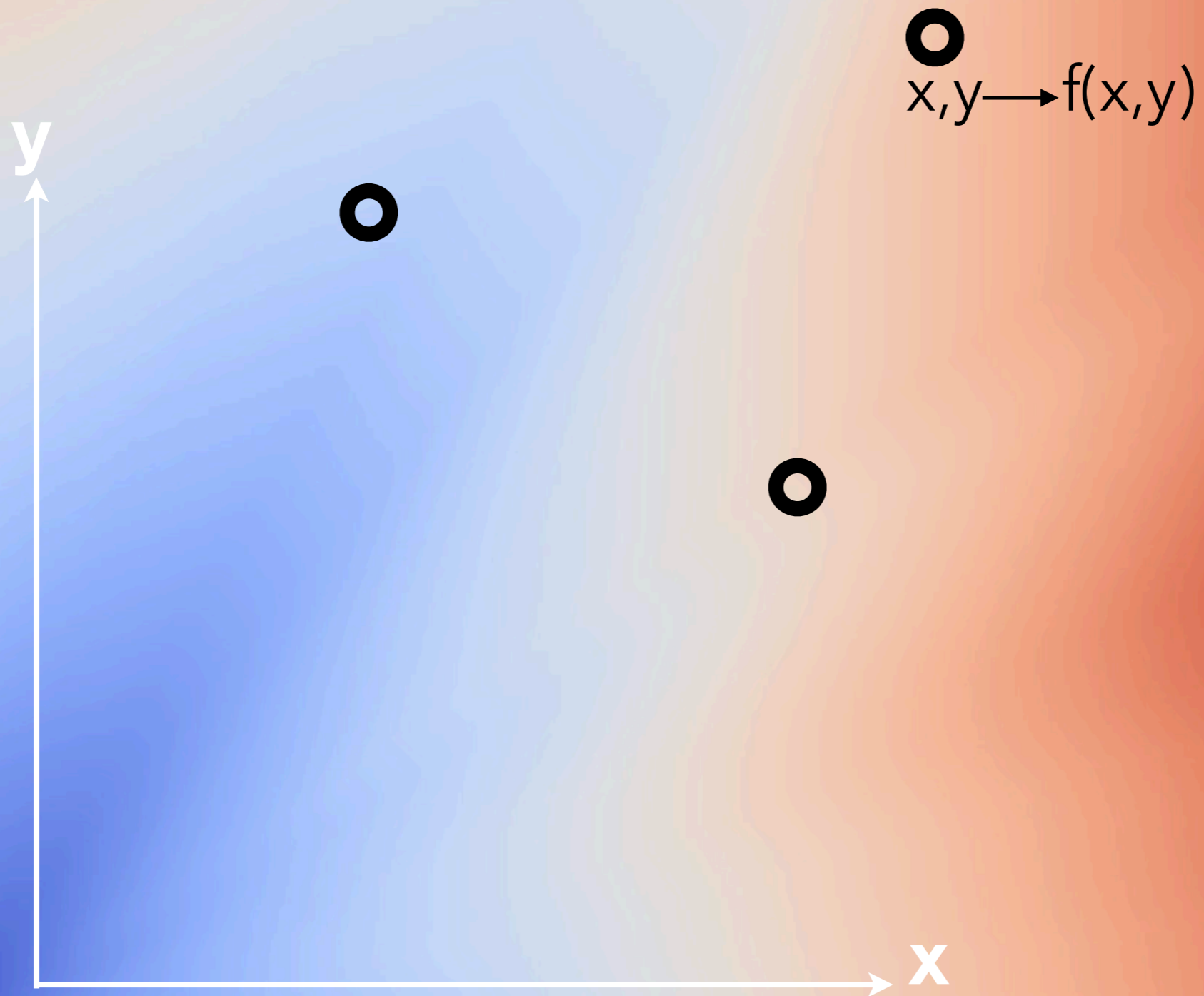
Farbe=f(x,y)



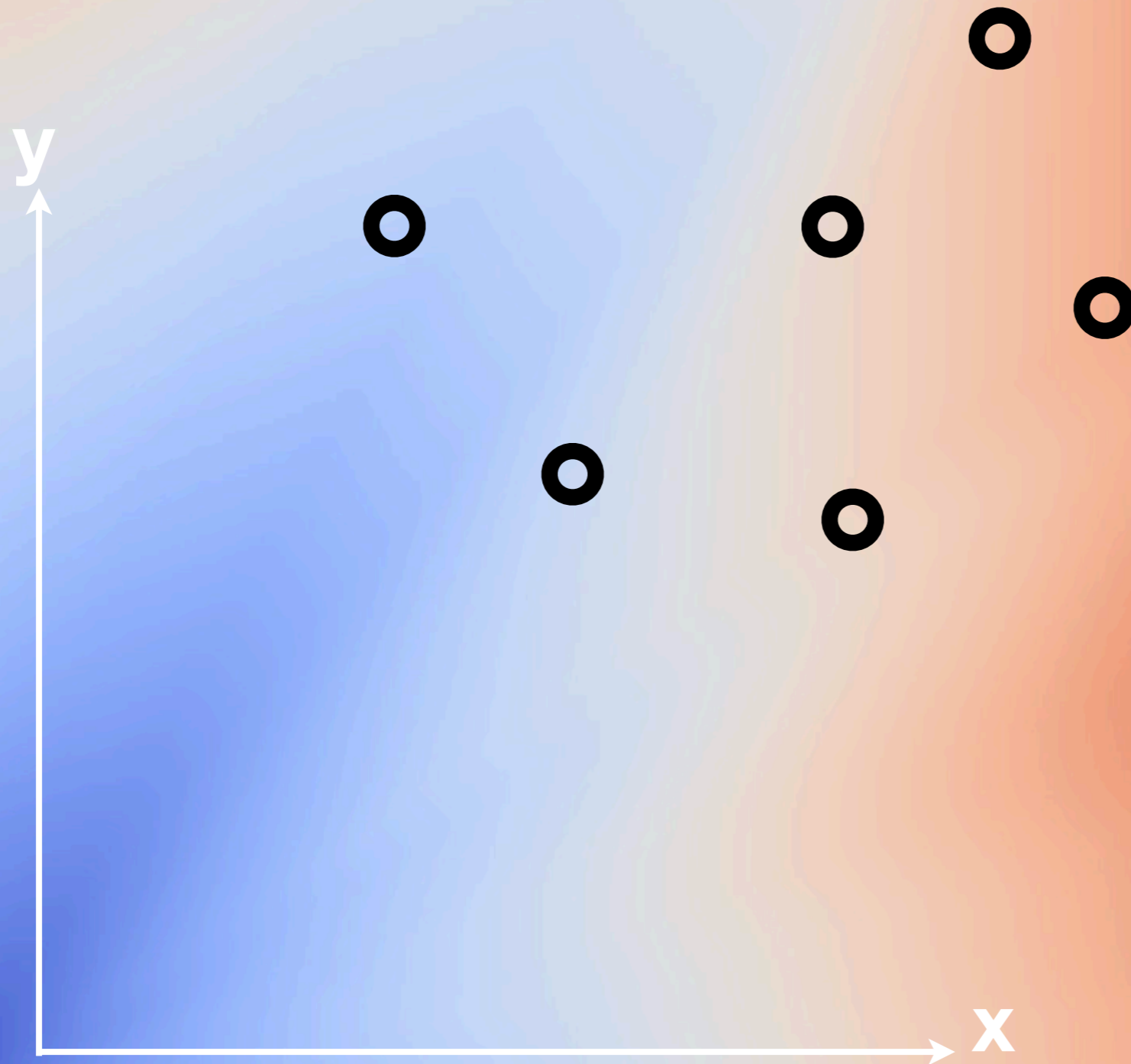
Beispiel: Lernen einer Funktion von 2 Variablen



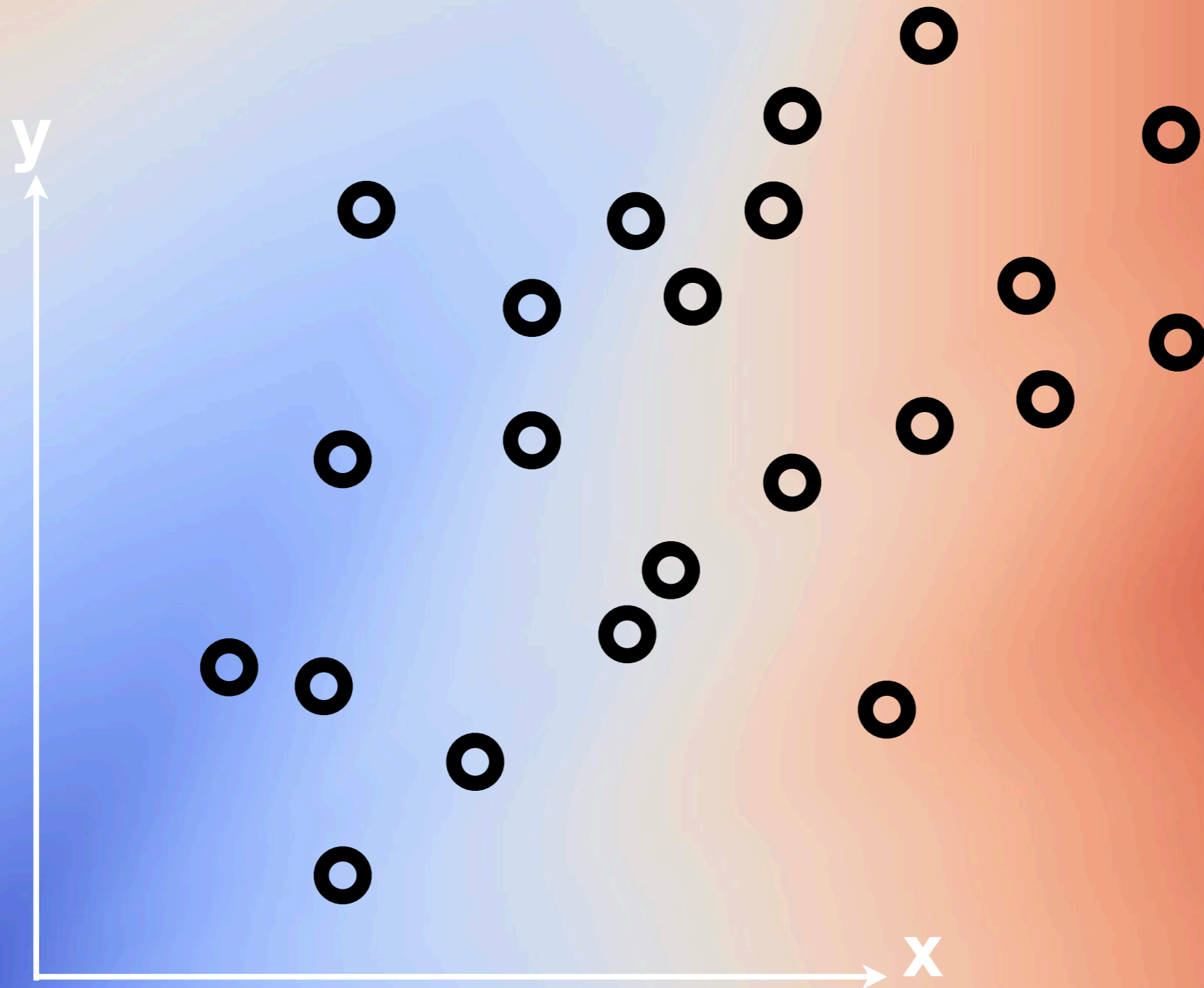
Beispiel: Lernen einer Funktion von 2 Variablen



Beispiel: Lernen einer Funktion von 2 Variablen



Beispiel: Lernen einer Funktion von 2 Variablen



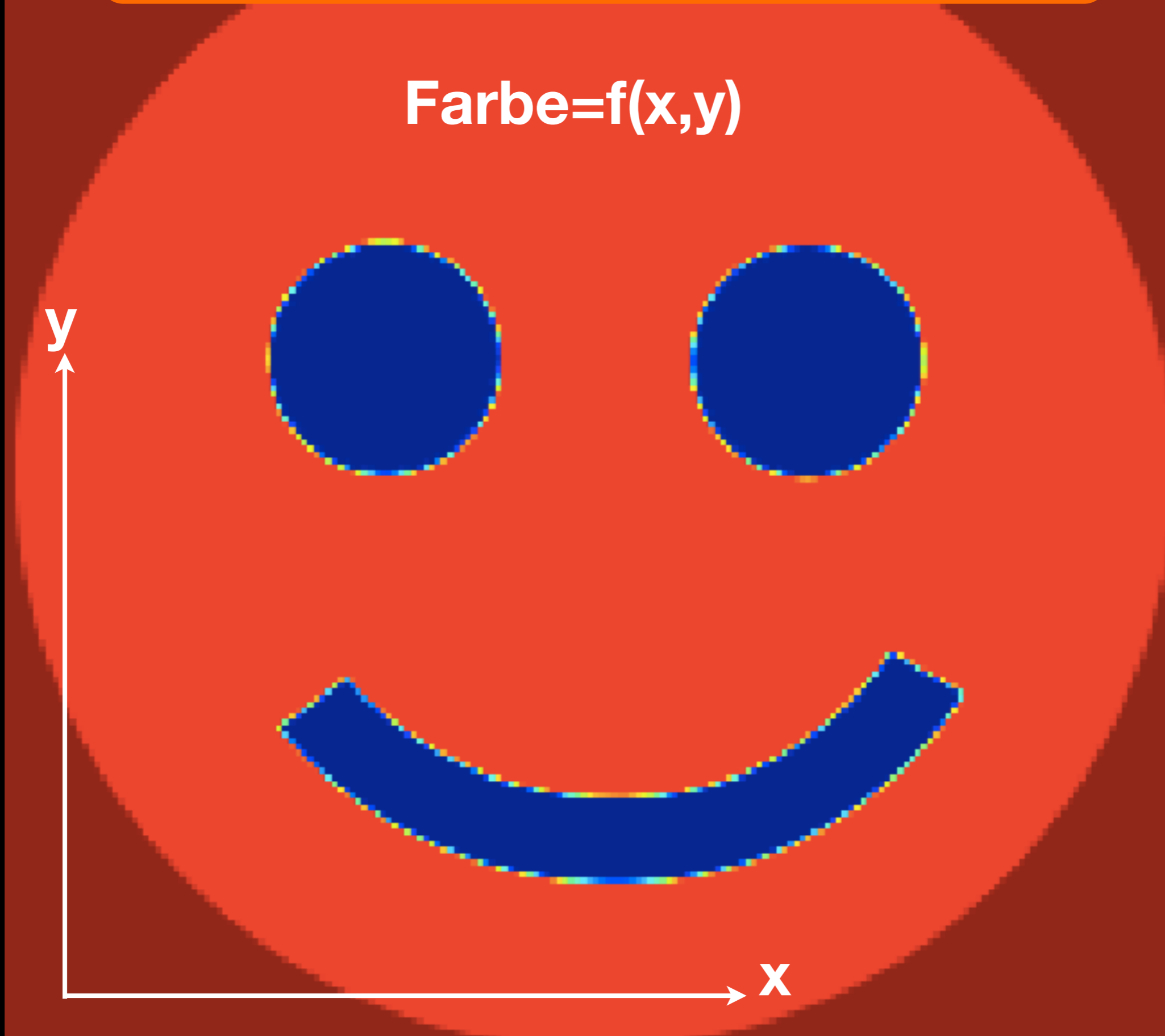
Beispiel

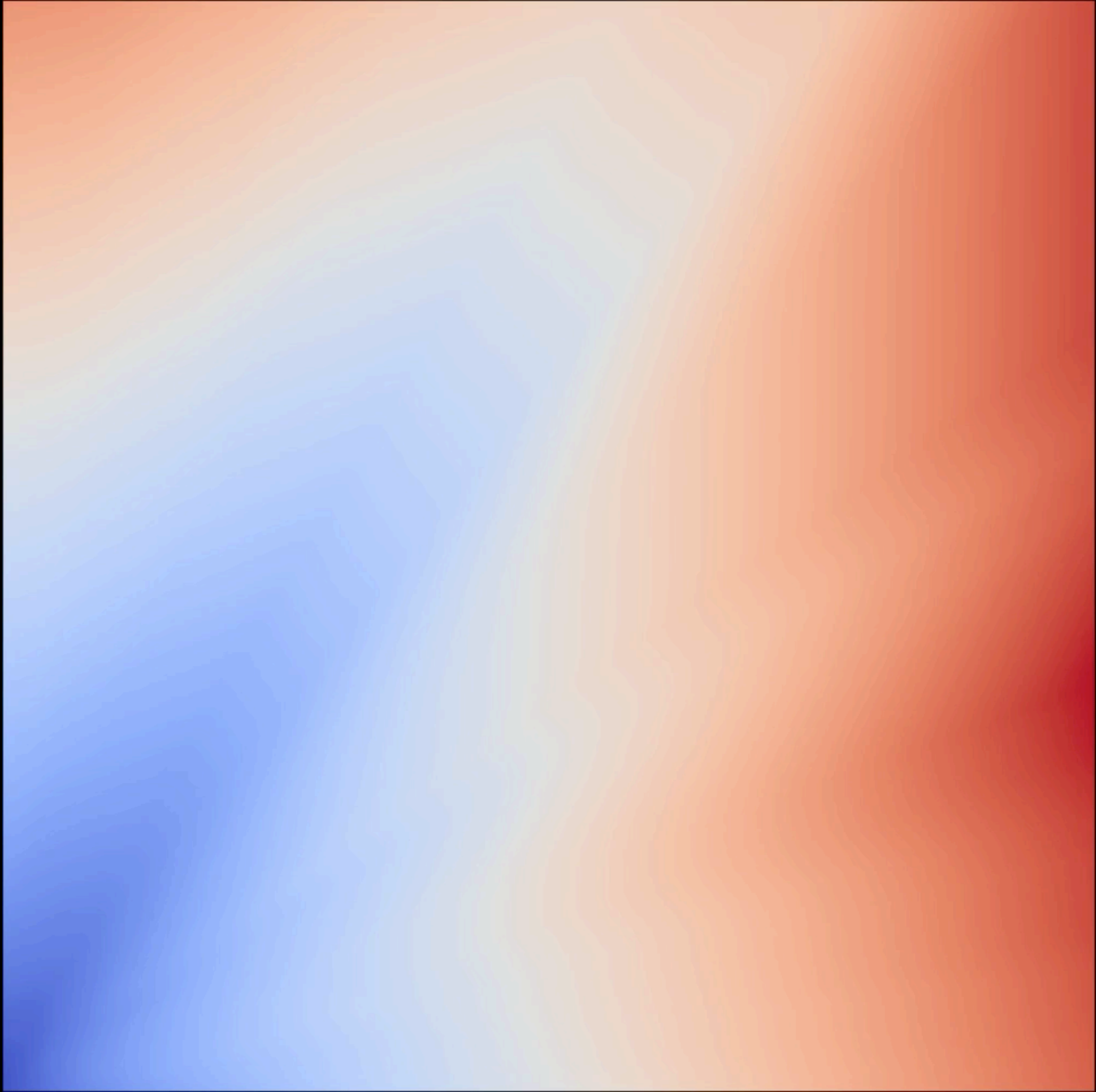
Farbe=f(x,y)

y



x





Zweites Beispiel: Bilderkennung

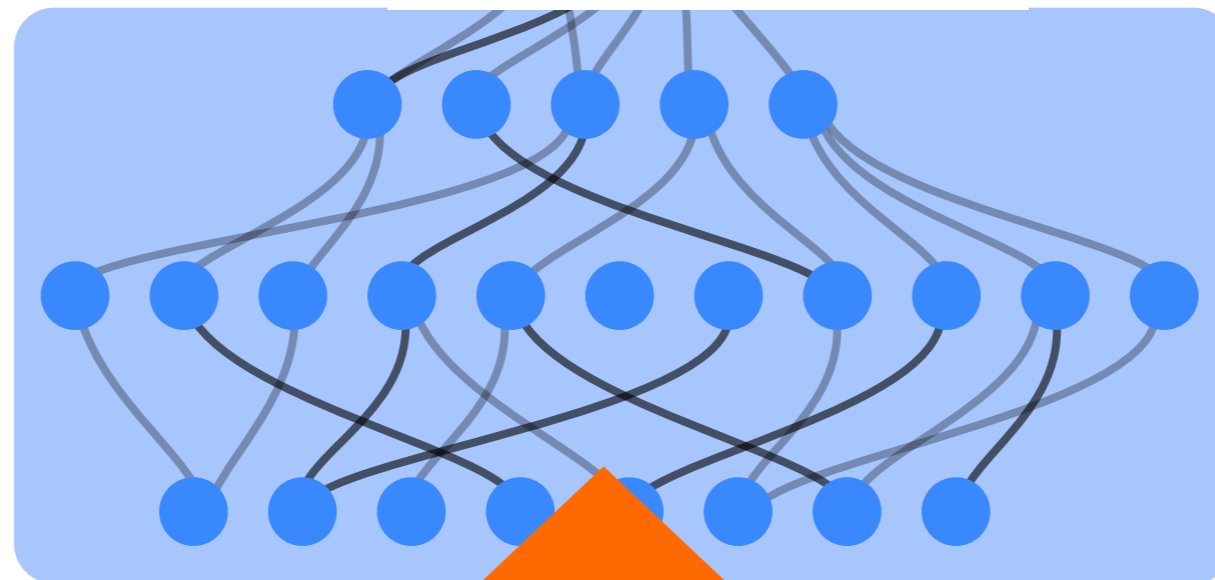


“MNIST” Datensatz (für Postleitzahlen)

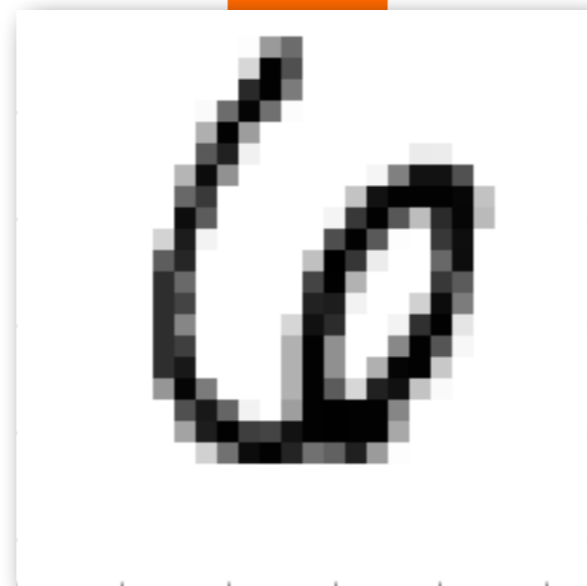
<http://yann.lecun.com/exdb/mnist/>

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0

Ergebnis: Klassifizierung
des Bildes



Eingang: Bild
28x28 Pixel
(=784)





Vorsicht



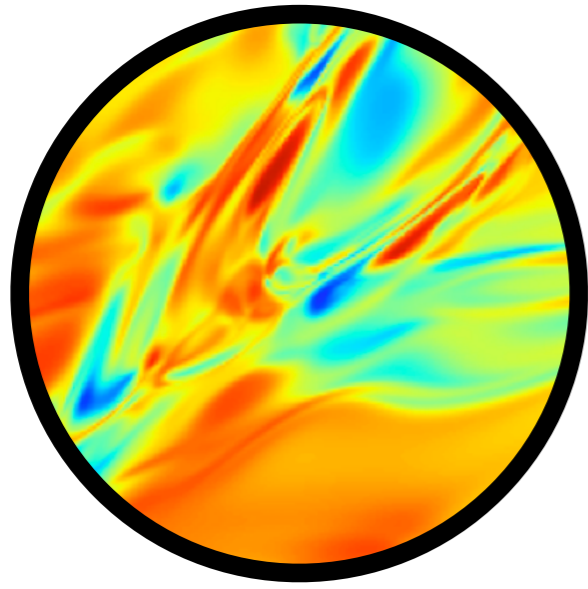
Vorsicht

Das Training eines neuronalen Netzes ist ein sehr komplizierter und zufallsgelenkter Prozess (nicht gut verstanden!)

Es kommt entscheidend auf die Qualität und Quantität der Trainingsdaten an

Ein gut funktionierendes Netzwerk ist kein Ersatz für elementares Verständnis der Daten

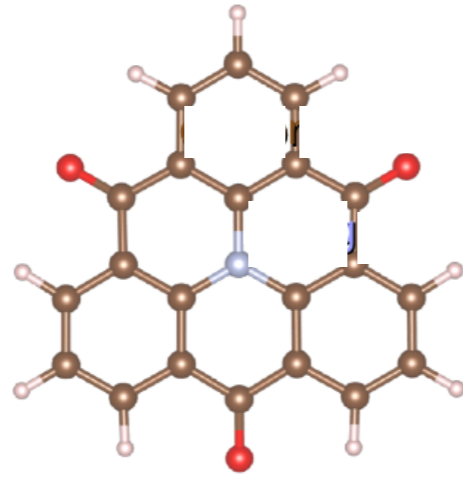
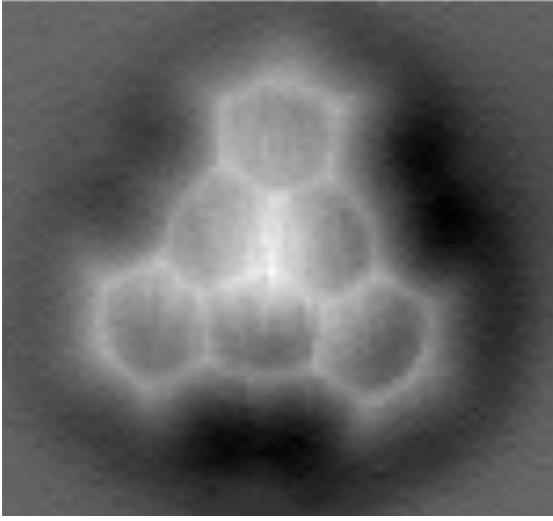
Die Interpretation eines Netzwerks ist schwierig



Anwendungen in der Wissenschaft

Quantenchemie

(Images: Wikipedia)



Molekulare
Struktur

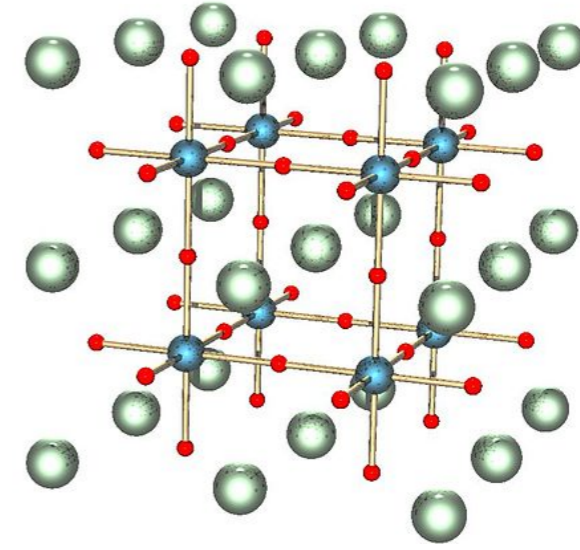
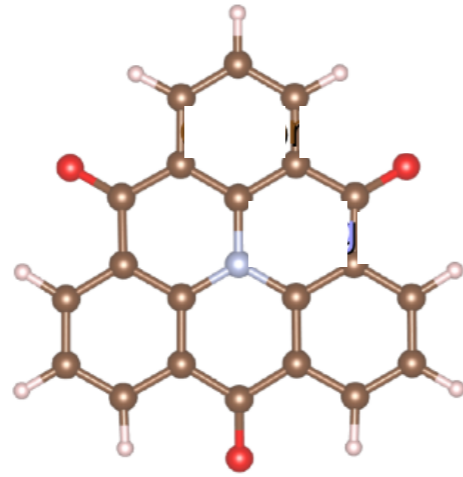
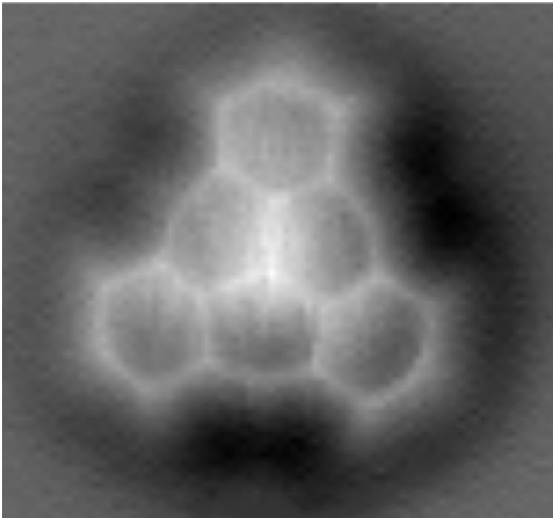


Bindungs-
Energie

Quantenchemie

Materialwissenschaft

(Images: Wikipedia)

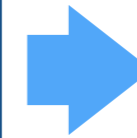


Molekulare
Struktur



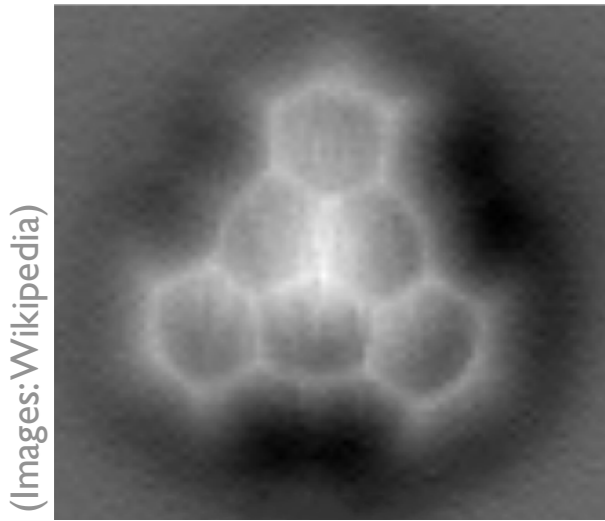
Bindungs-
Energie

Atome

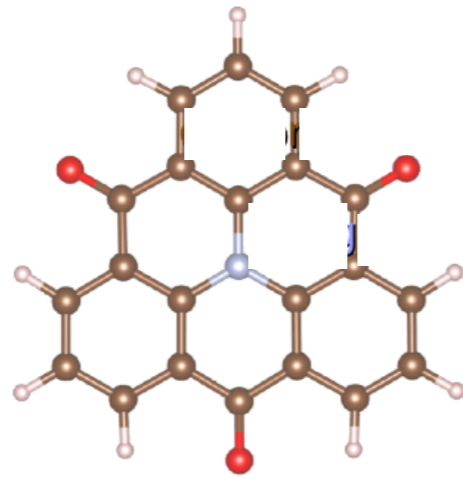


Struktur
 $T_{\text{melt}}, T_{\text{c}}, \dots$

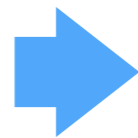
Quantenchemie



(Images: Wikipedia)

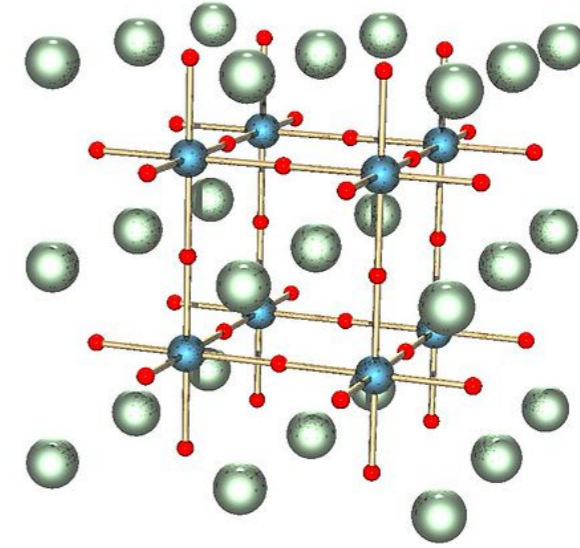


Molekulare
Struktur

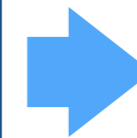


Bindungs-
Energie

Materialwissenschaft

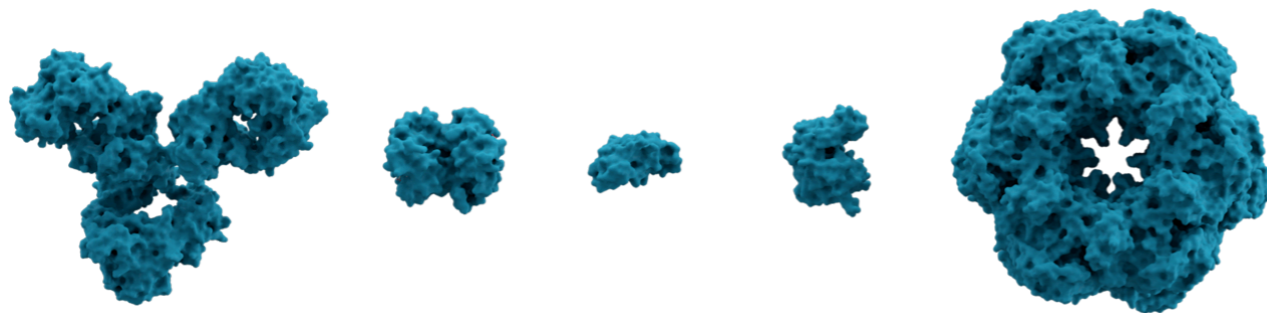


Atome



Struktur
 $T_{\text{melt}}, T_{\text{c}}, \dots$

Strukturbiologie

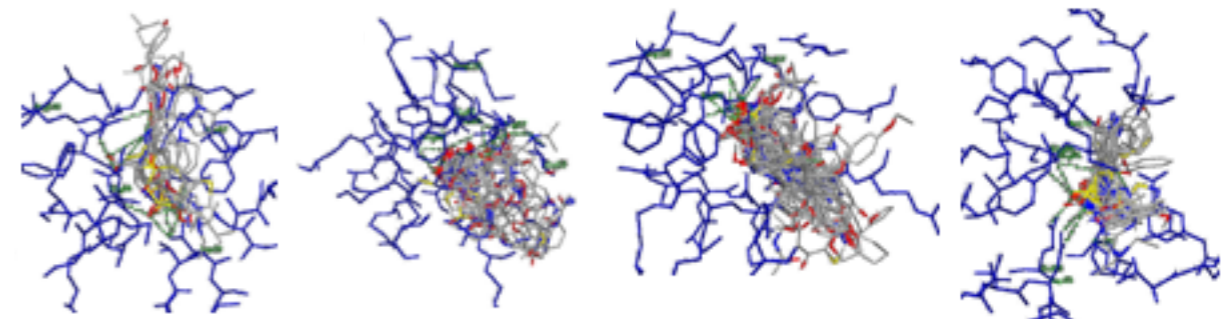


Protein-
Sequenz

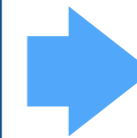


Struktur

Medikamenten-Design

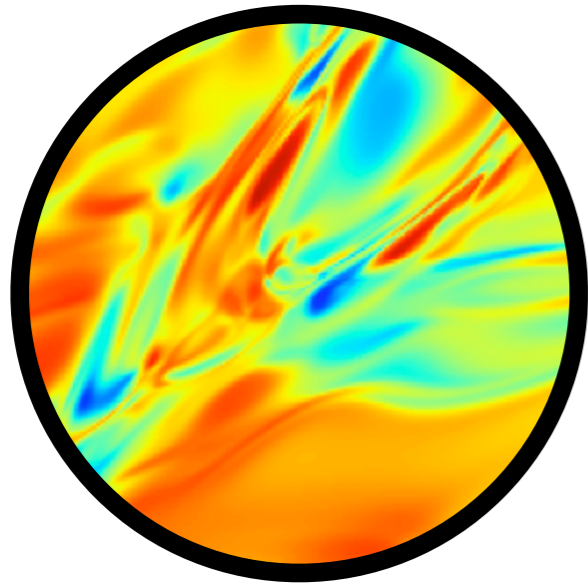


Molekül



Aktivität/
Toxizität

**...und alle Gebiete, wo
große Datenmengen
verfügbar sind!**



Anwendungen in der Physik

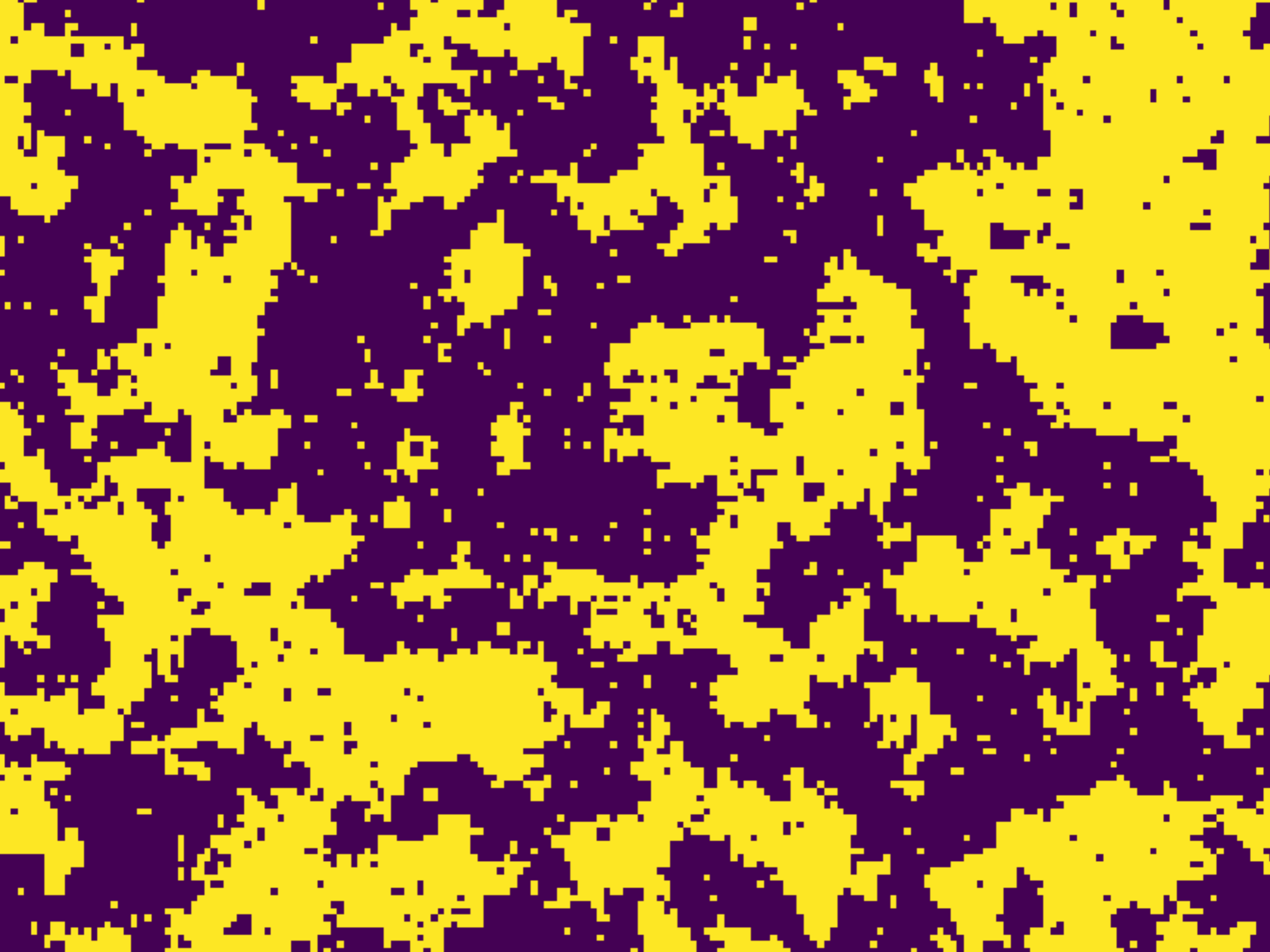
(besonders seit 2016)

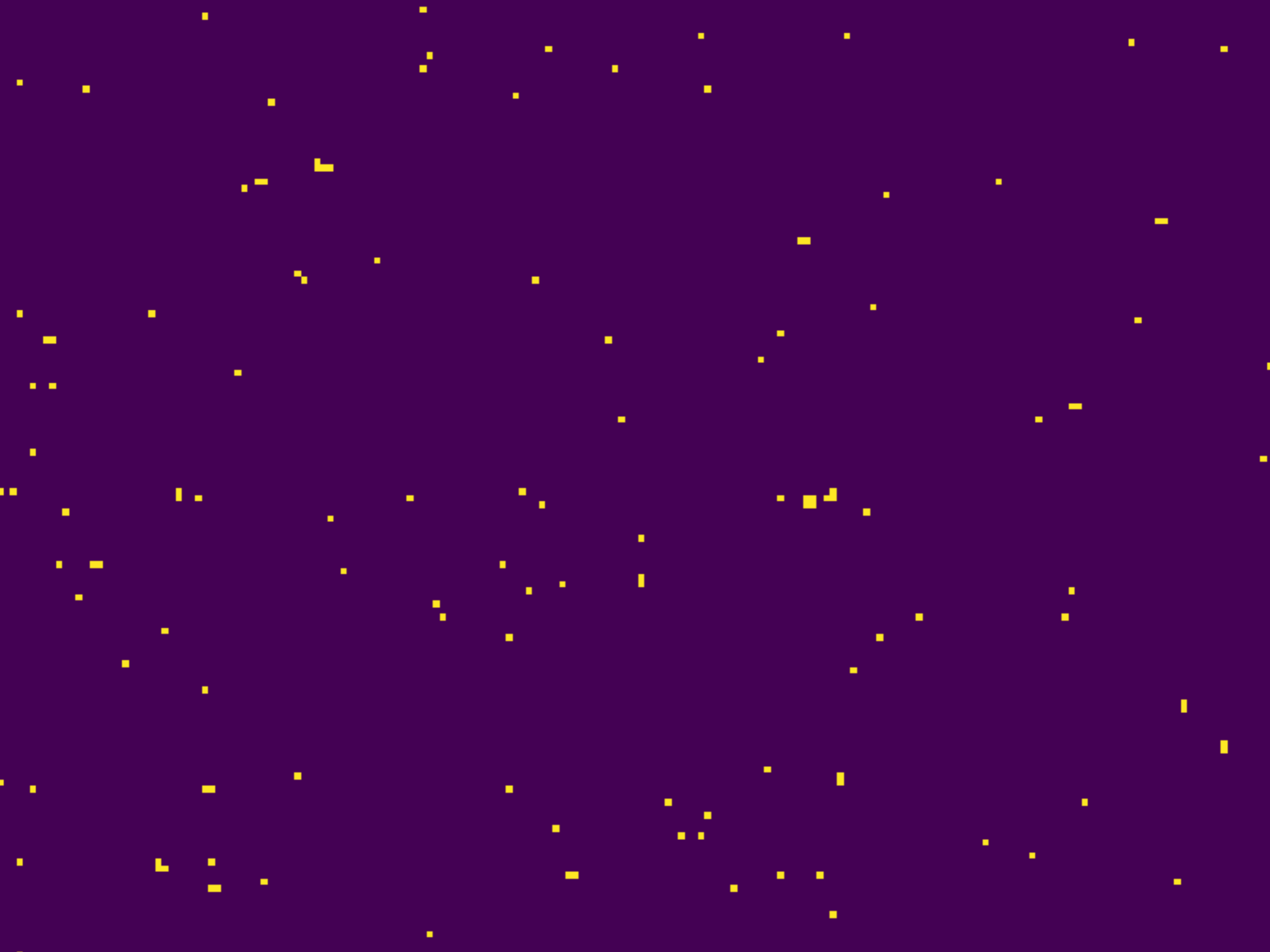
Bildererkennung, zum Beispiel: Klassifizierung von Galaxien

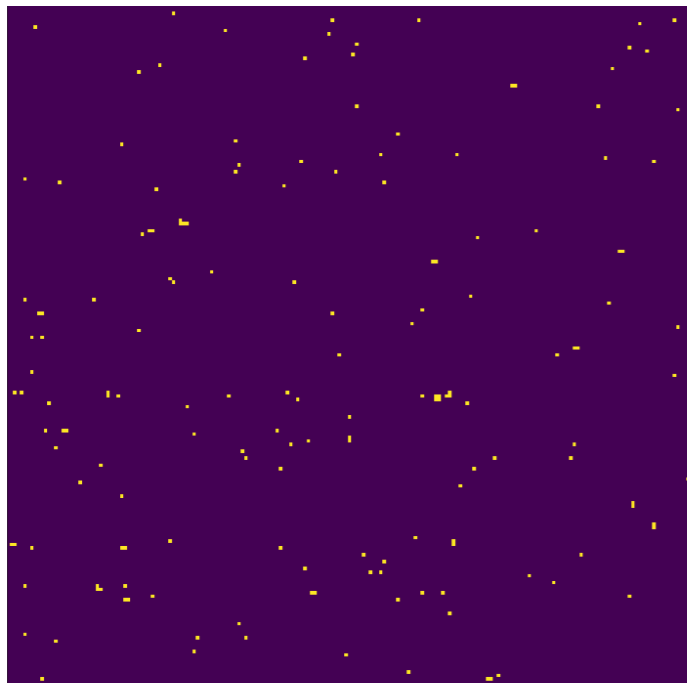


Bildererkennung, zum Beispiel:

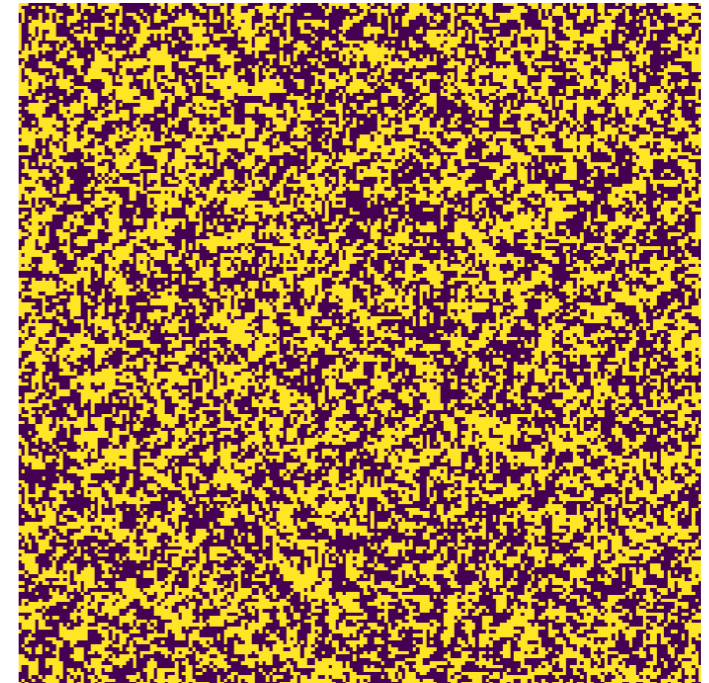
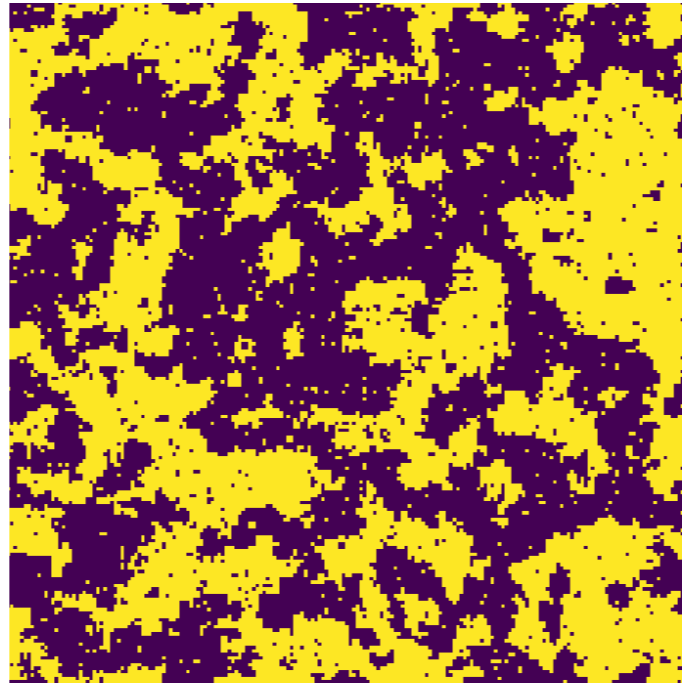
Magnetismus



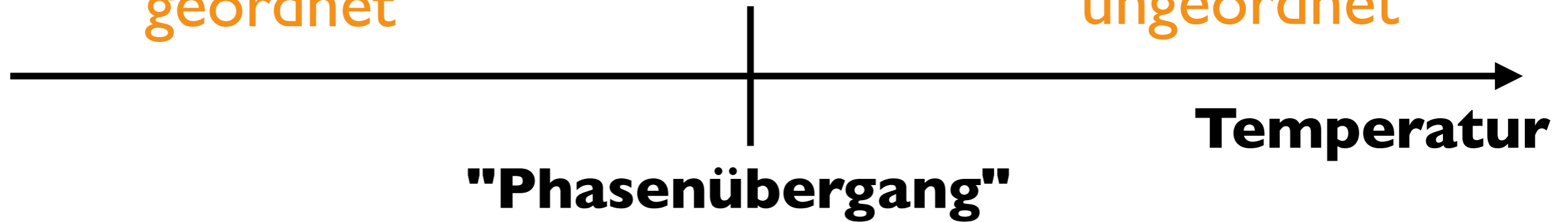




“geordnet”



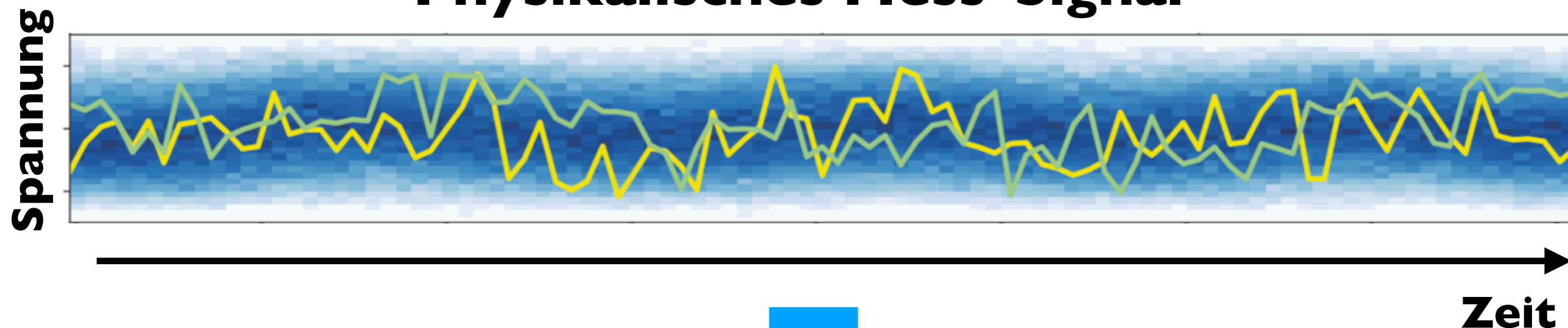
“ungeordnet”



Erkennen verschiedener "Phasen"
von Materialien

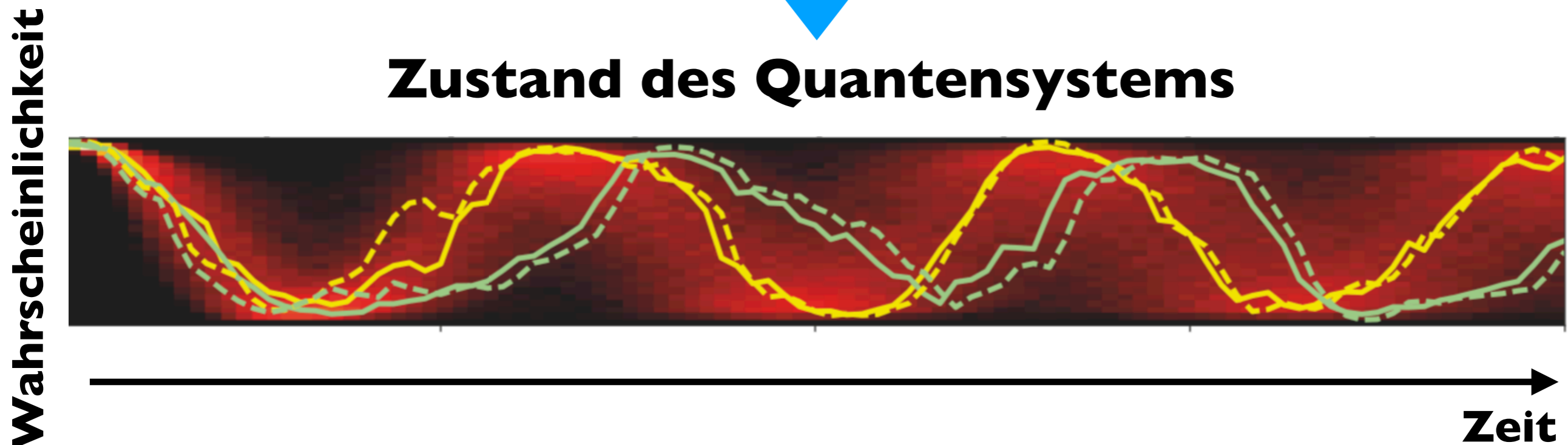
Messungen auswerten

Physikalisches Mess-Signal

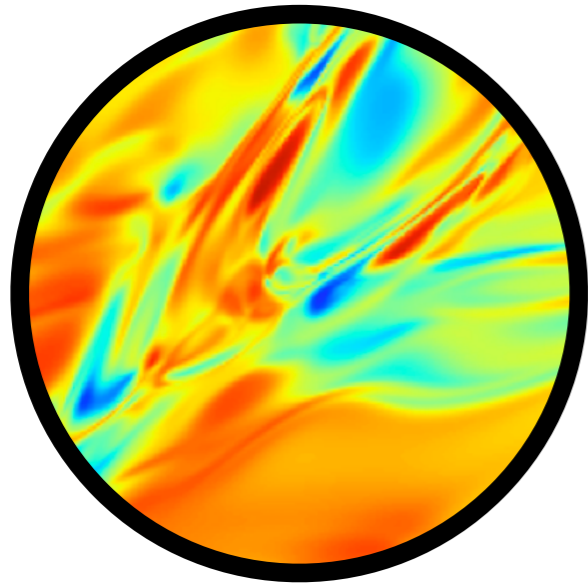


Neuronales Netz

Zustand des Quantensystems

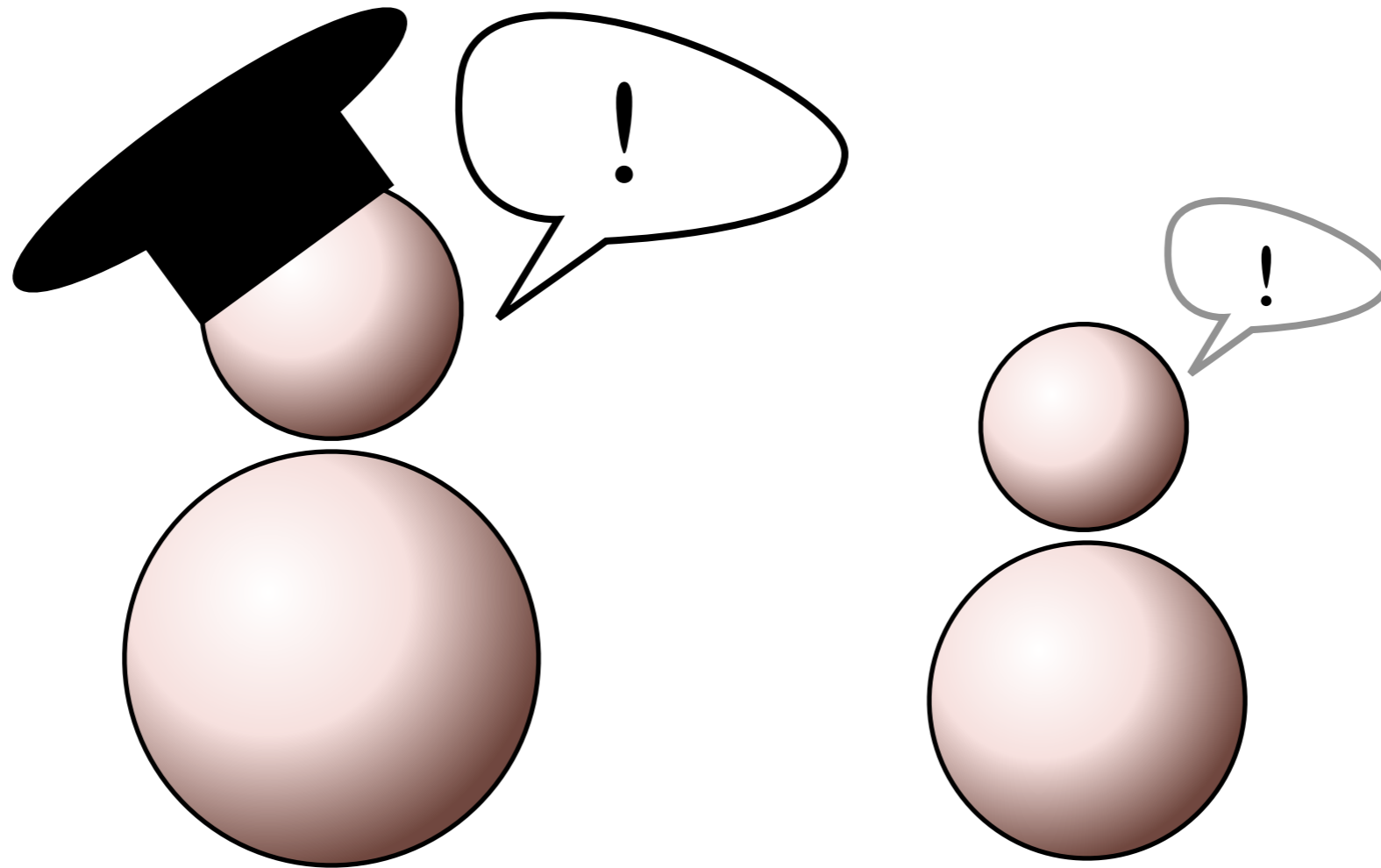


(pictures: Siddiqi group, Berkeley)



Selbständiges Lernen

"Überwachtes Lernen" (der Normalfall für neuronale Netze)

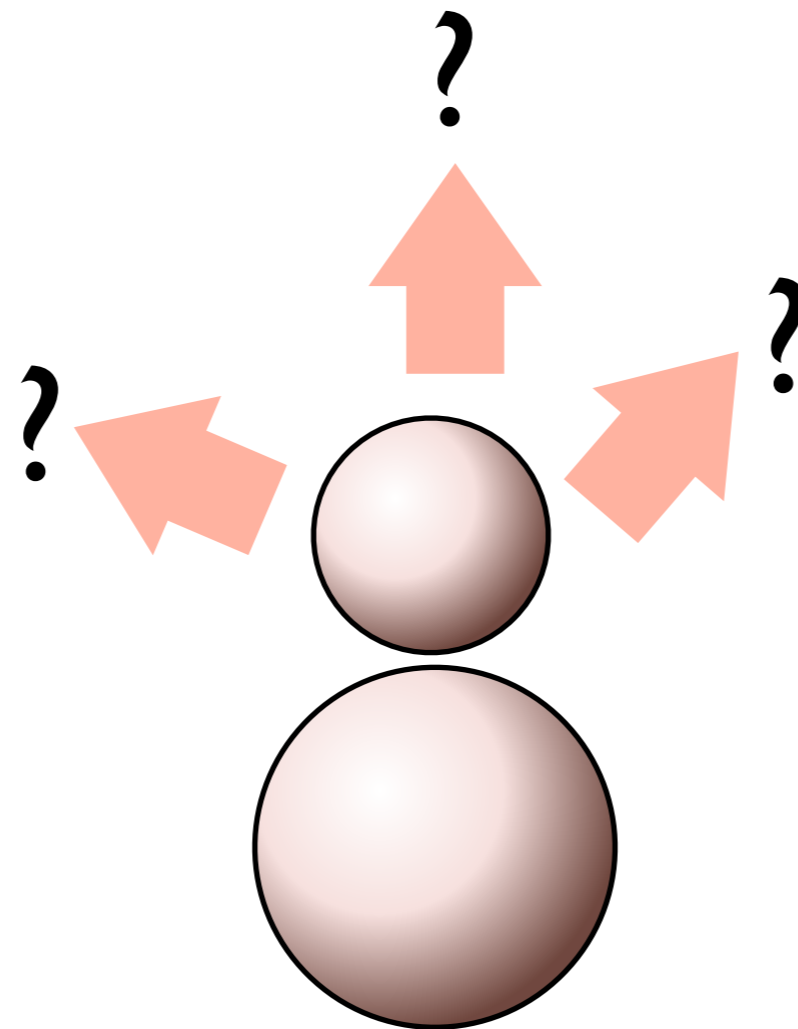


Lehrer

Schüler

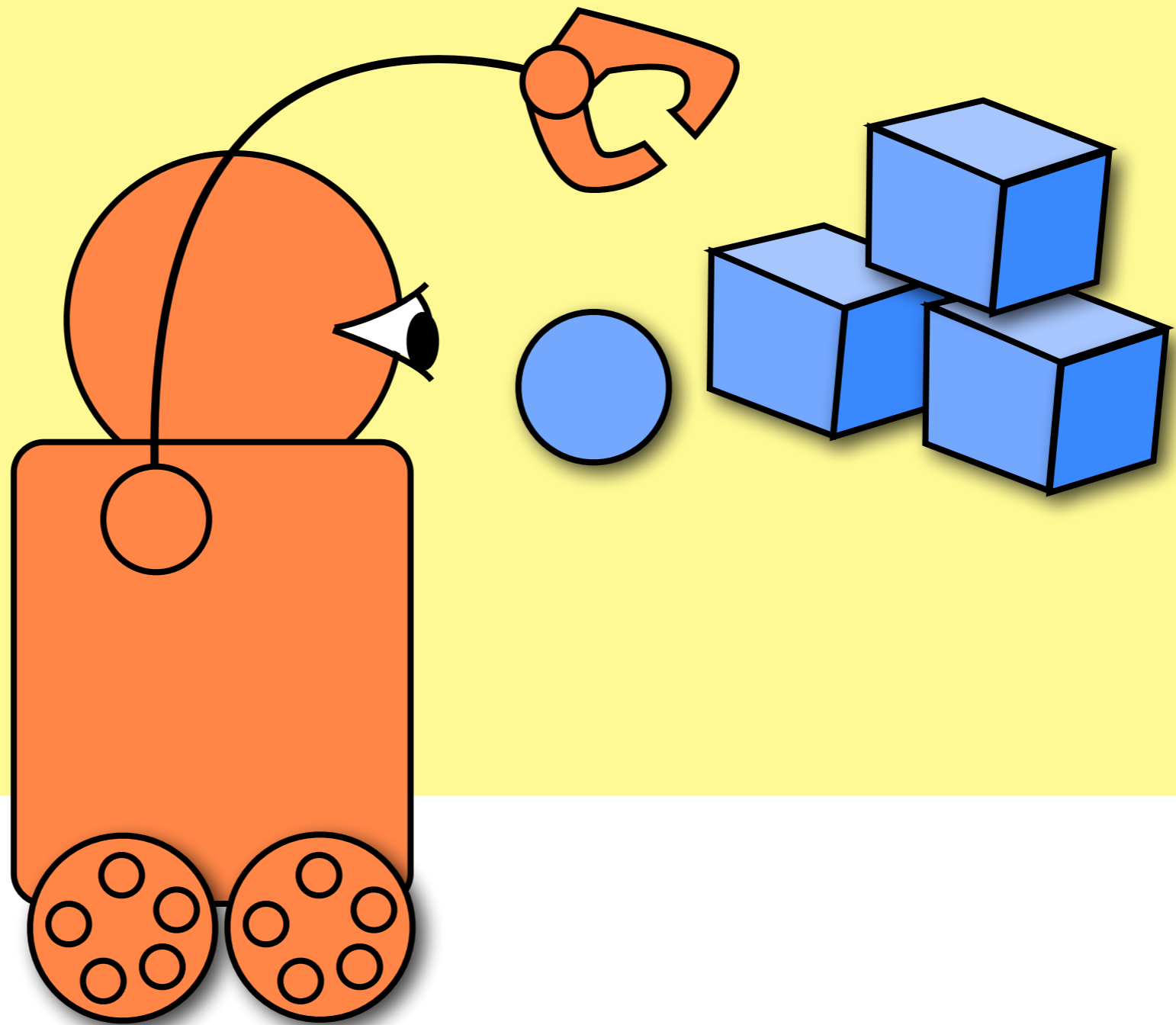
Endergebnis: wird nie besser werden als
der Lehrer

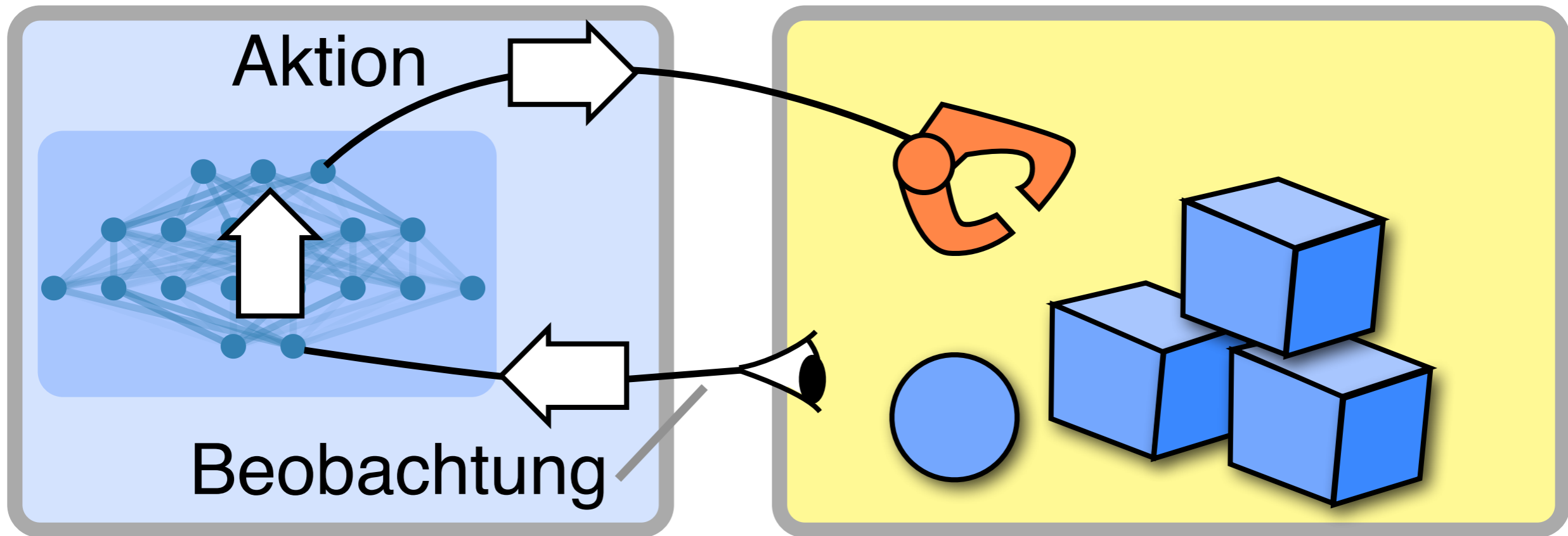
"Eigenständiges / Verstärkendes Lernen"



Schüler (oder Wissenschaftler)
(probiert Dinge aus und wiederholt, was gut läuft)

Kann beliebig gut werden!







**Google's AlphaGo Defeats Chinese Go
Master in Win for A.I.**

(New York Times 2017)

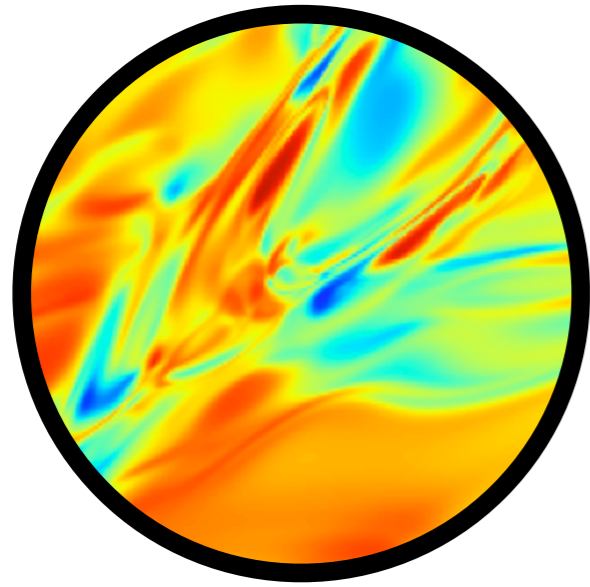
Image: Wikipedia

Brettspiel-Turnier

AlphaGo besiegt nächsten Top-Spieler

(Spiegel 2017)

Go



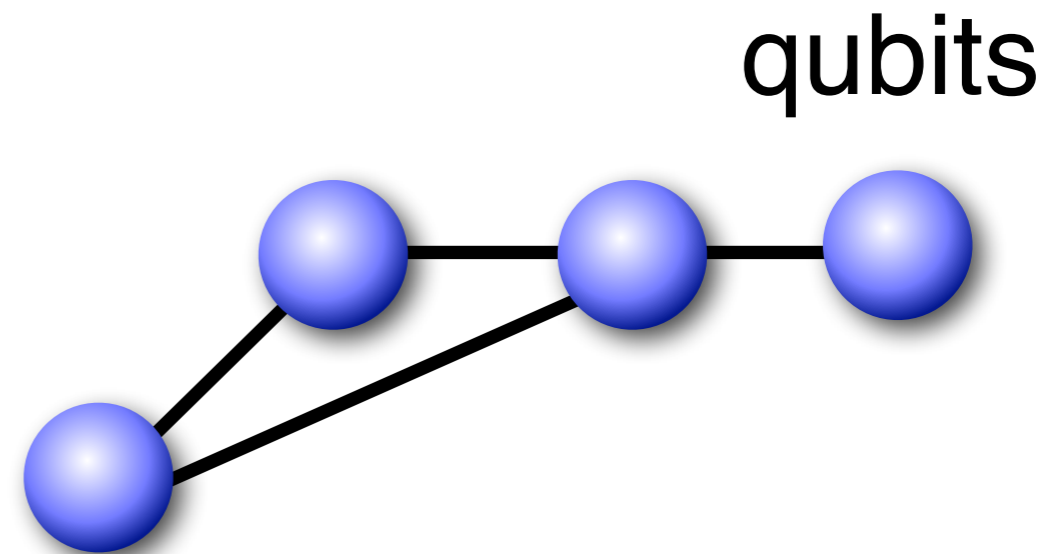
Aus unserer
eigenen Forschung:
Beispiel
Quantenfehlerkorrektur

(Arbeit mit
Thomas Fösel, Talitha Weiss und Petru Tighineanu)

Quantencomputer

Quantencomputer

Sollen zukünftig spezielle Aufgaben extrem viel schneller bearbeiten können als normale ("klassische") Computer



Quantencomputer

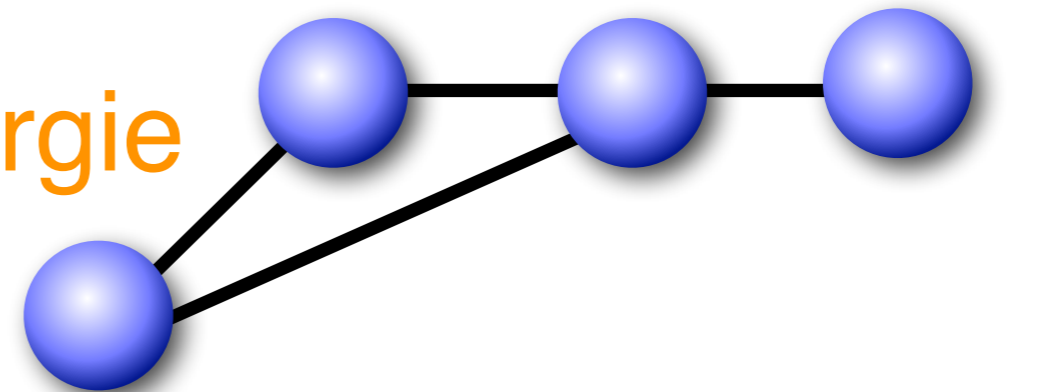
Sollen zukünftig spezielle Aufgaben extrem viel schneller bearbeiten können als normale ("klassische") Computer

qubit: hat zwei Quantenzustände

— hohe Energie

— niedrige Energie

(Beispiel: Atom)



Quantencomputer

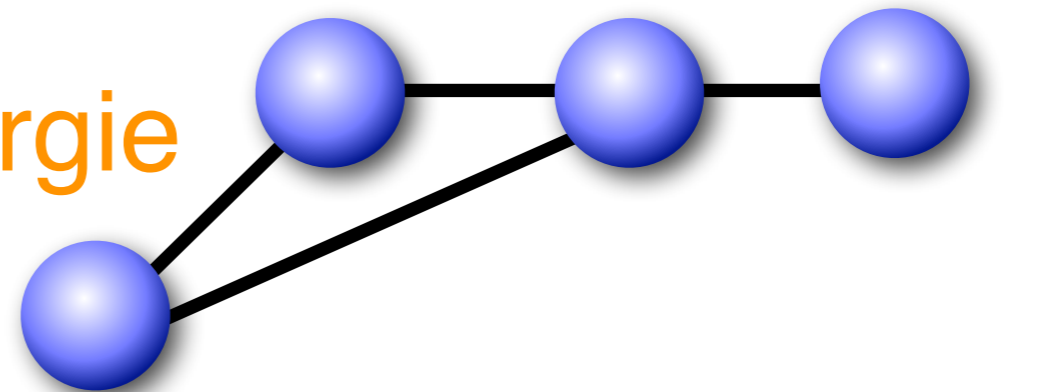
Sollen zukünftig spezielle Aufgaben extrem viel schneller bearbeiten können als normale ("klassische") Computer

qubit: hat zwei Quantenzustände

$|1\rangle$ — hohe Energie

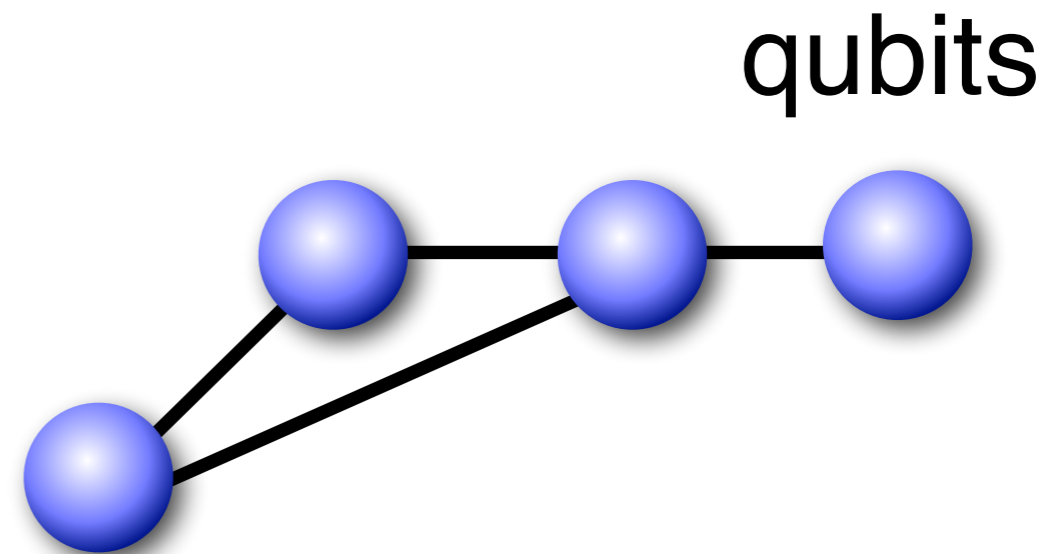
$|0\rangle$ — niedrige Energie

(Beispiel: Atom)



Quantencomputer

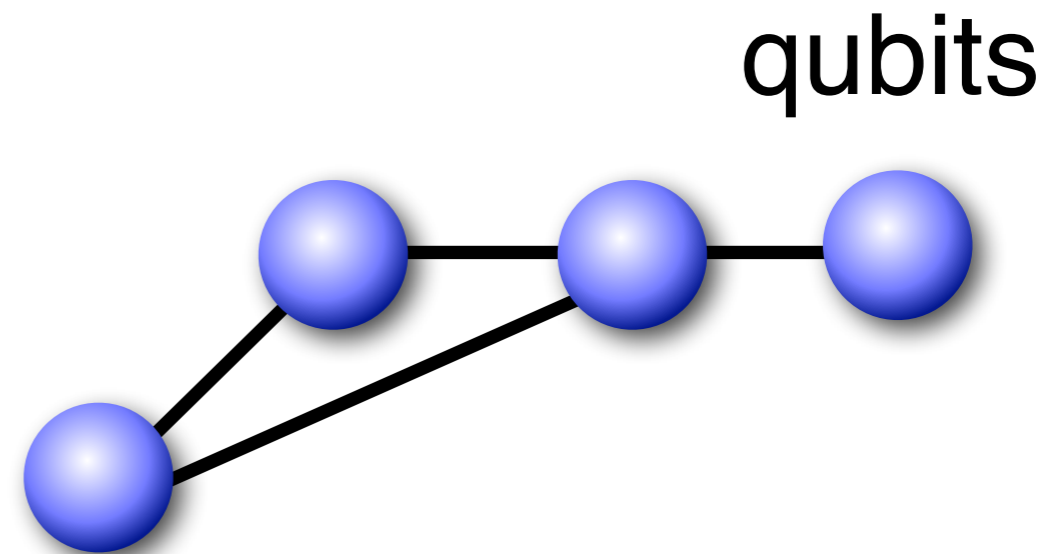
Sollen zukünftig spezielle Aufgaben extrem viel schneller bearbeiten können als normale ("klassische") Computer



Überlagerung: $|0\rangle + |1\rangle$

Quantencomputer

Sollen zukünftig spezielle Aufgaben extrem viel schneller bearbeiten können als normale ("klassische") Computer



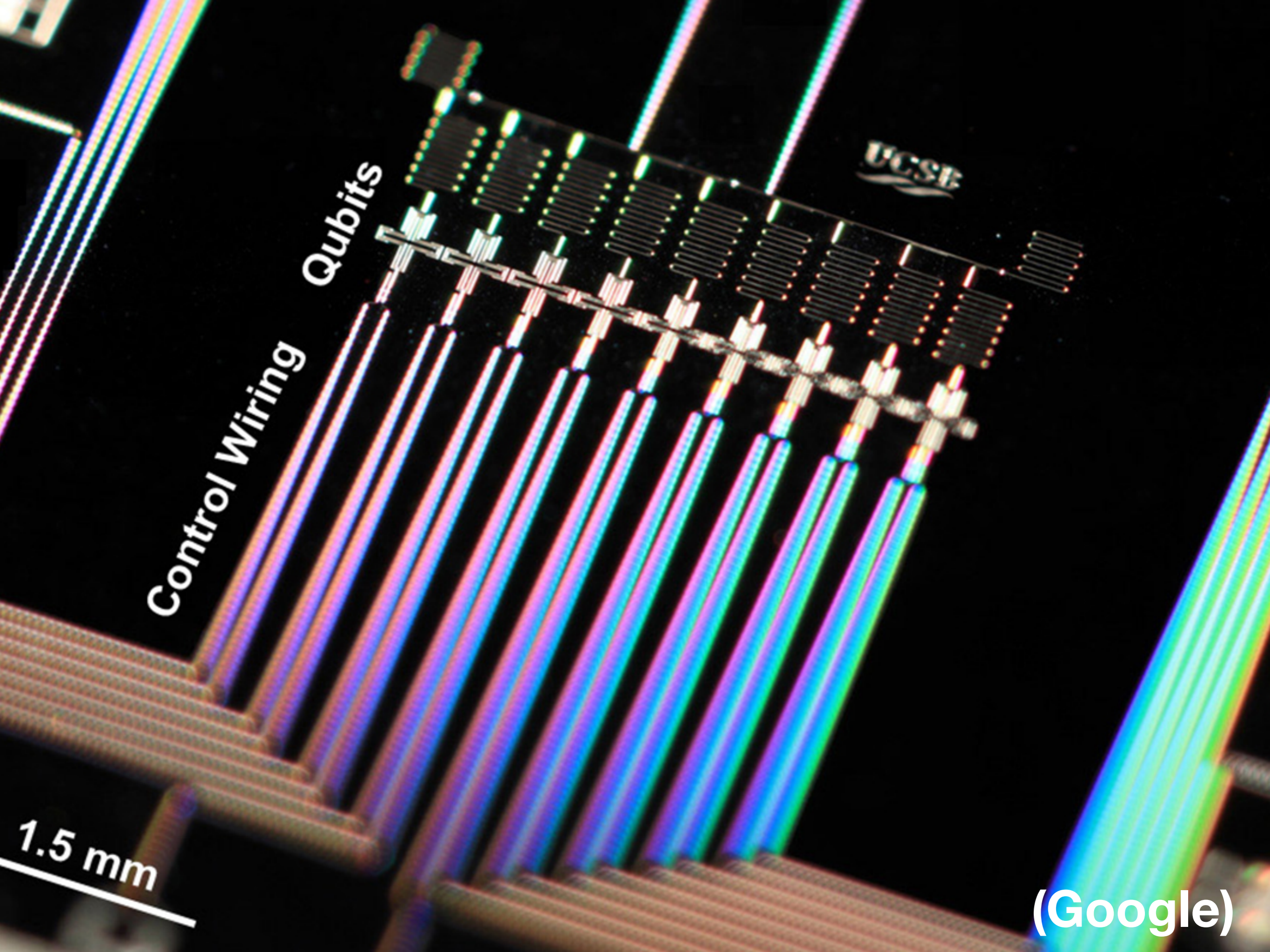
Überlagerung (viele qubits):

$$|0000\rangle + |0001\rangle + |0010\rangle + \dots + |1010\rangle + \dots$$



50 qubits

(Google)



Control Wiring
Qubits

UCSB

1.5 mm

(Google)



(sehr kalt)

(Google)

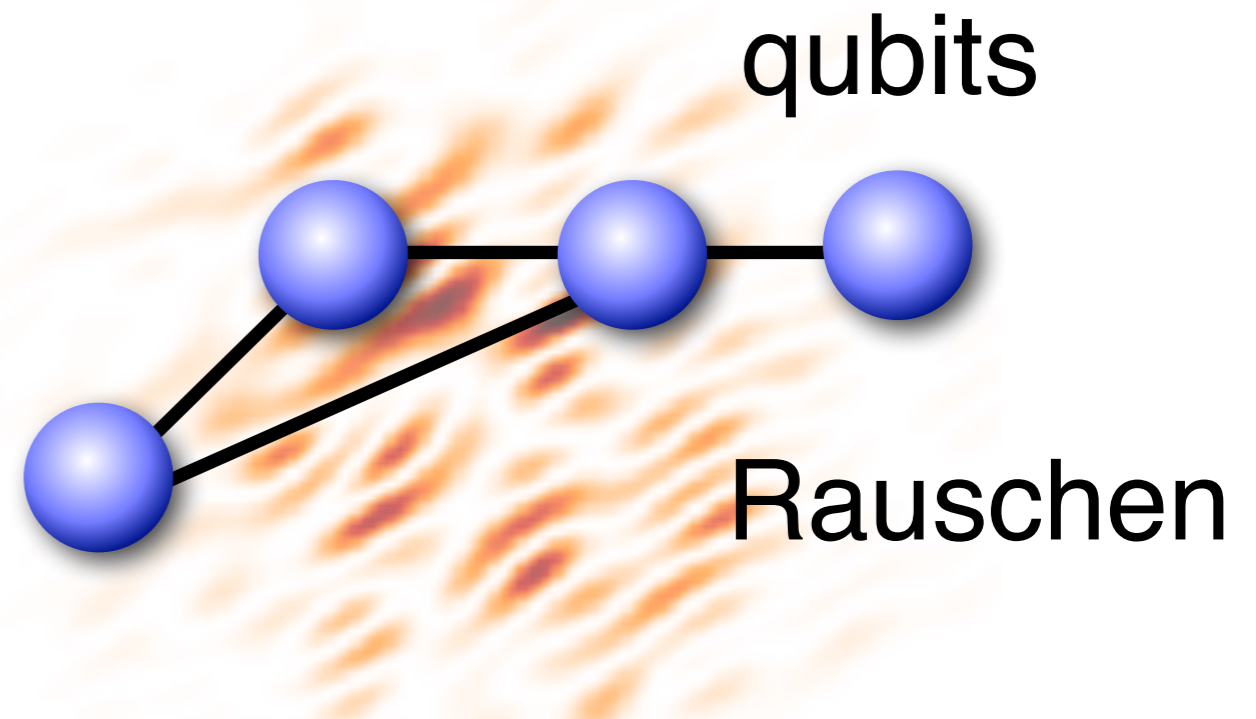
Beispiel:

Bessere

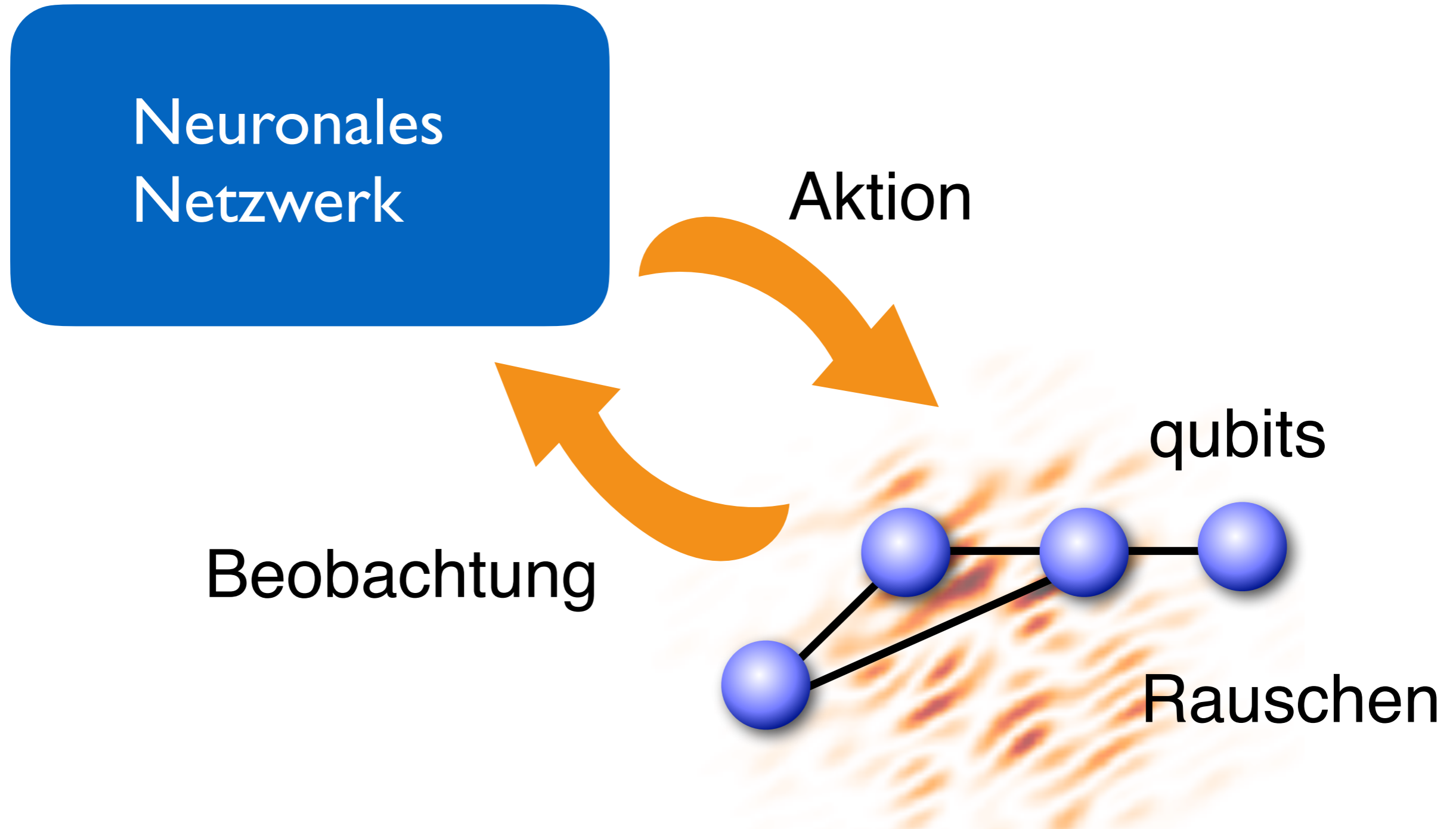
Quantenspeicher

Das Problem: Rauschen führt zu
Fehlern im Quantencomputer

...brauchen: Fehlerkorrektur!



Unsere Idee: Ein Netzwerk findet eine gute Strategie gegen die Fehler

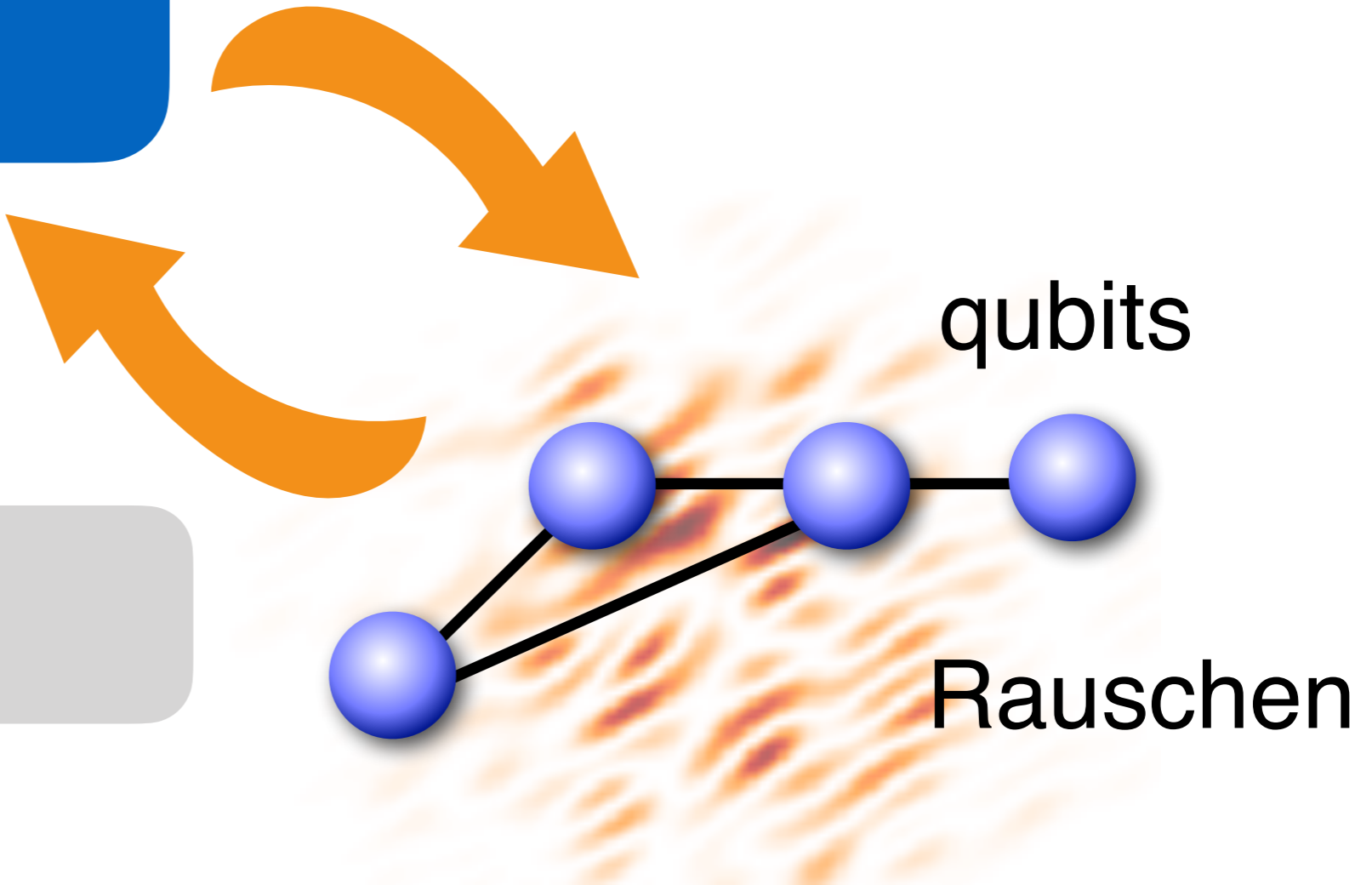


Neuronales
Netzwerk

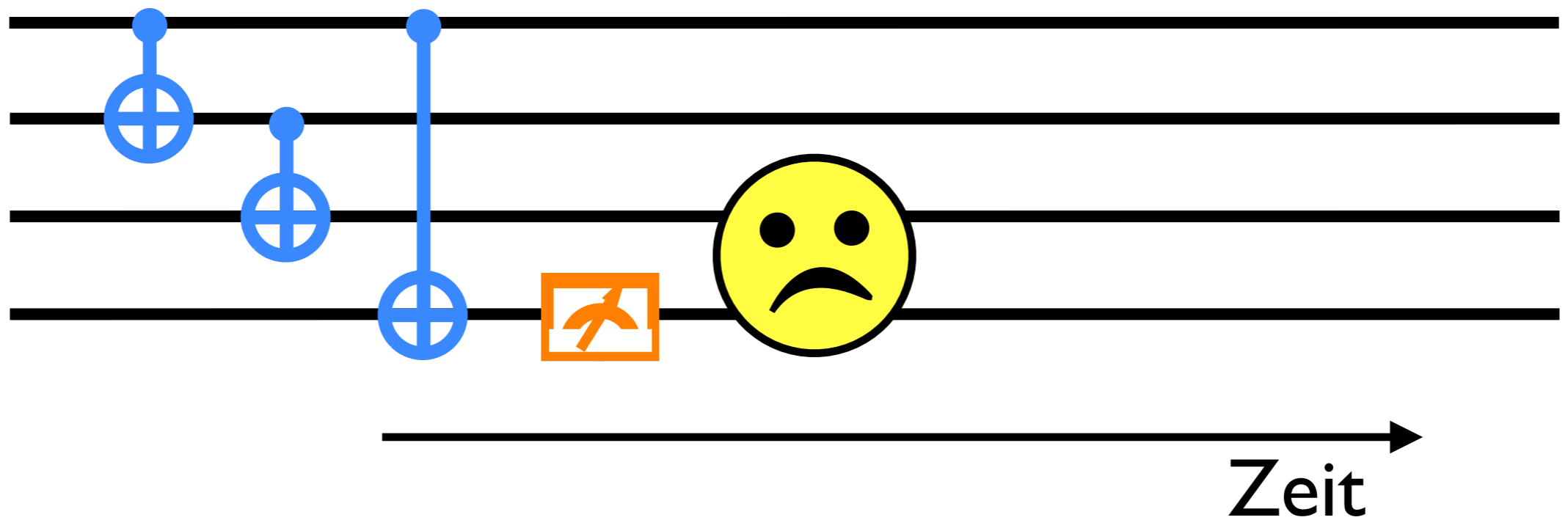
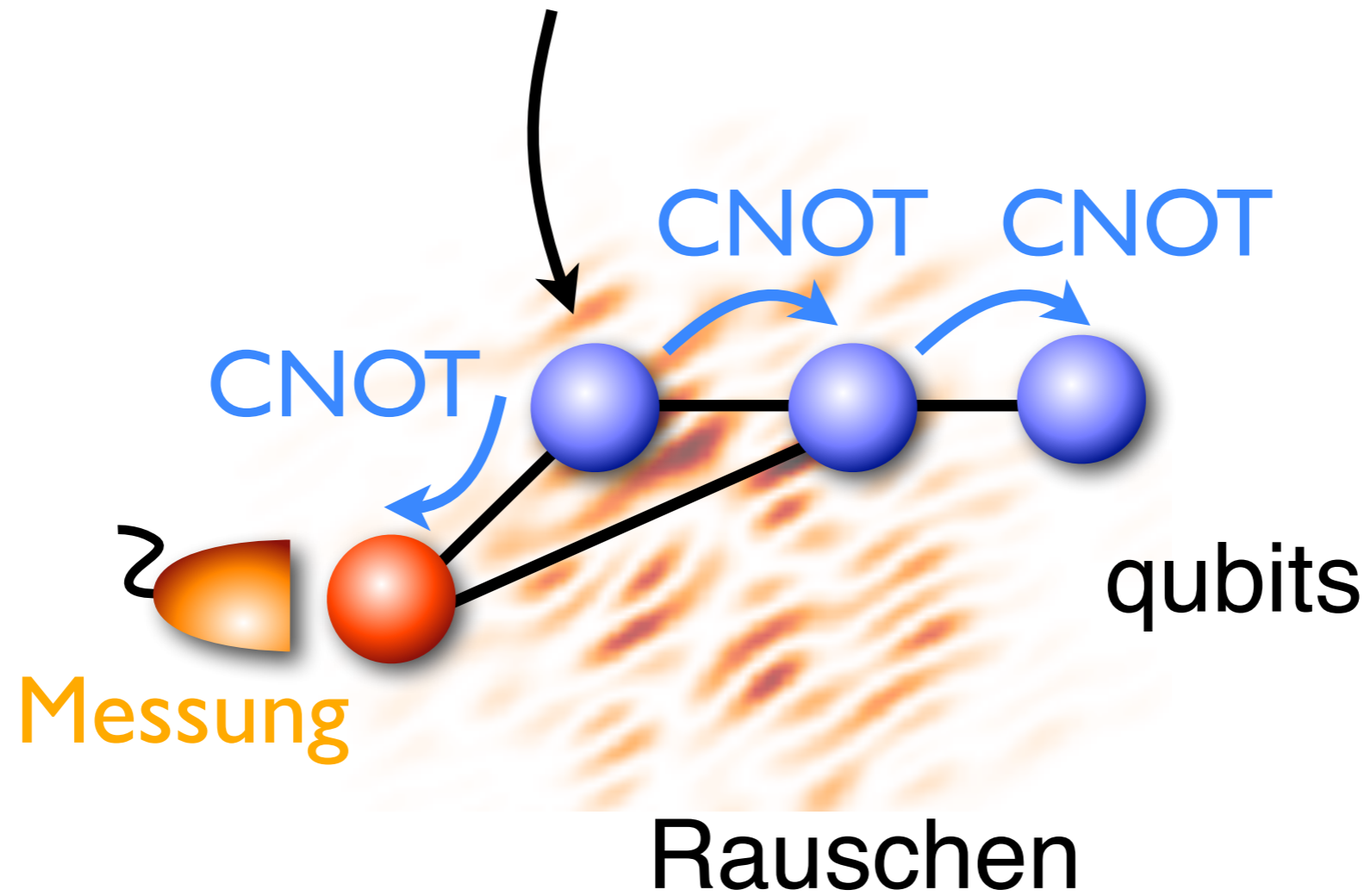
Aktionen:
Bitflip CNOT Messung

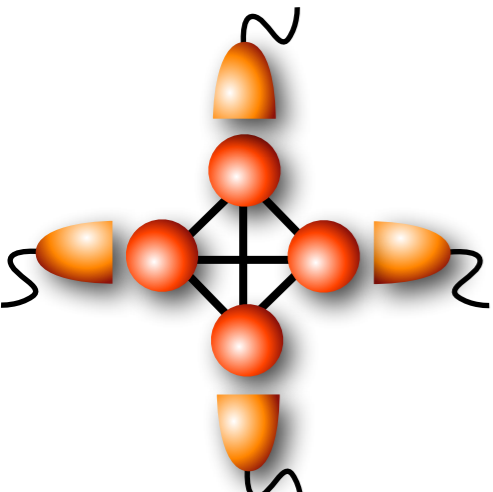


Messergebnis



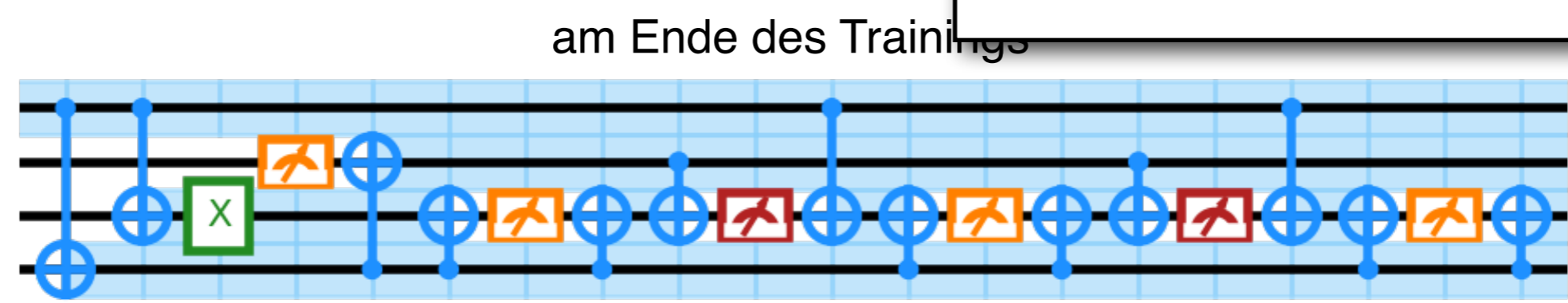
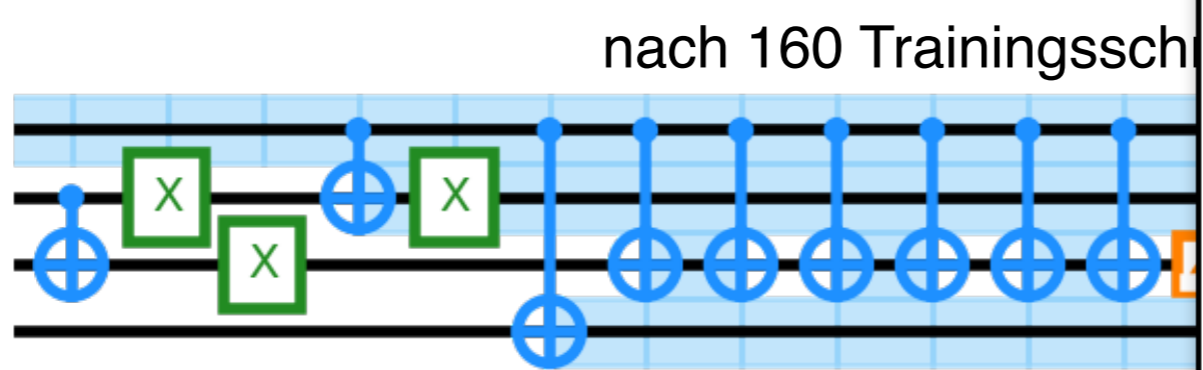
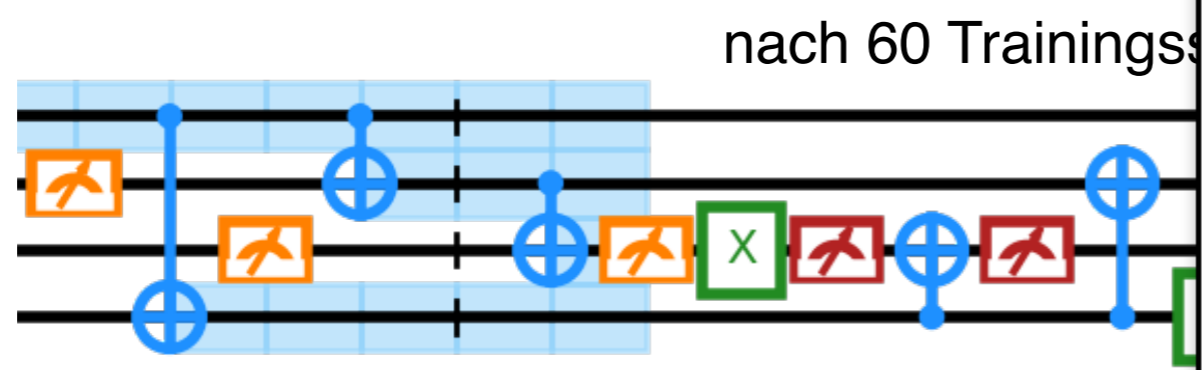
Qubit initialisiert





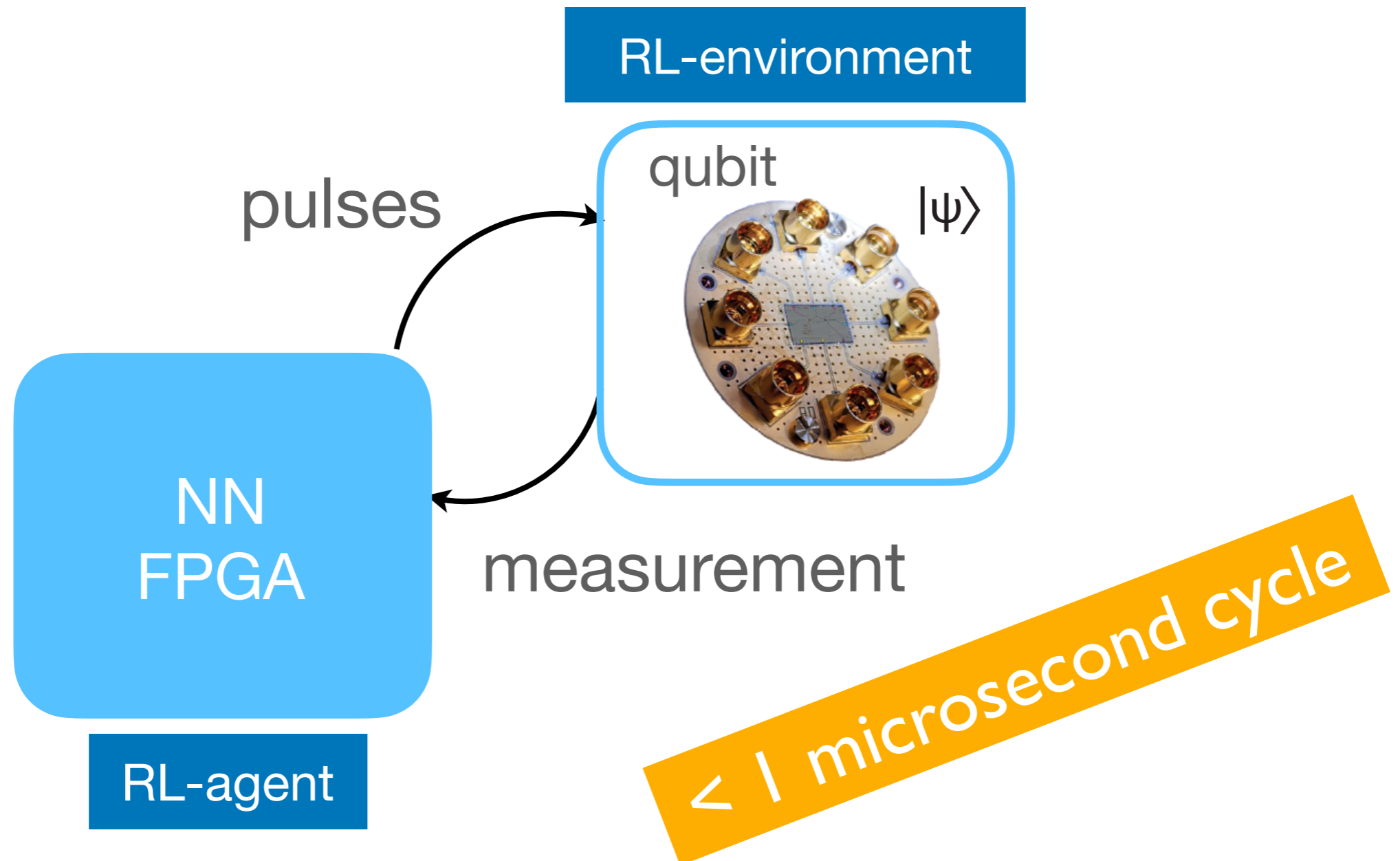
Das Netzwerk...

- vermeidet zerstörende Messungen
- findet einen guten "Code"
- entdeckt clevere Messungen
- korrigiert Fehler



Erste Schritte im Experiment: Qubit-Kontrolle

real-time feedback control
via deep reinforcement learning



Zukunft:

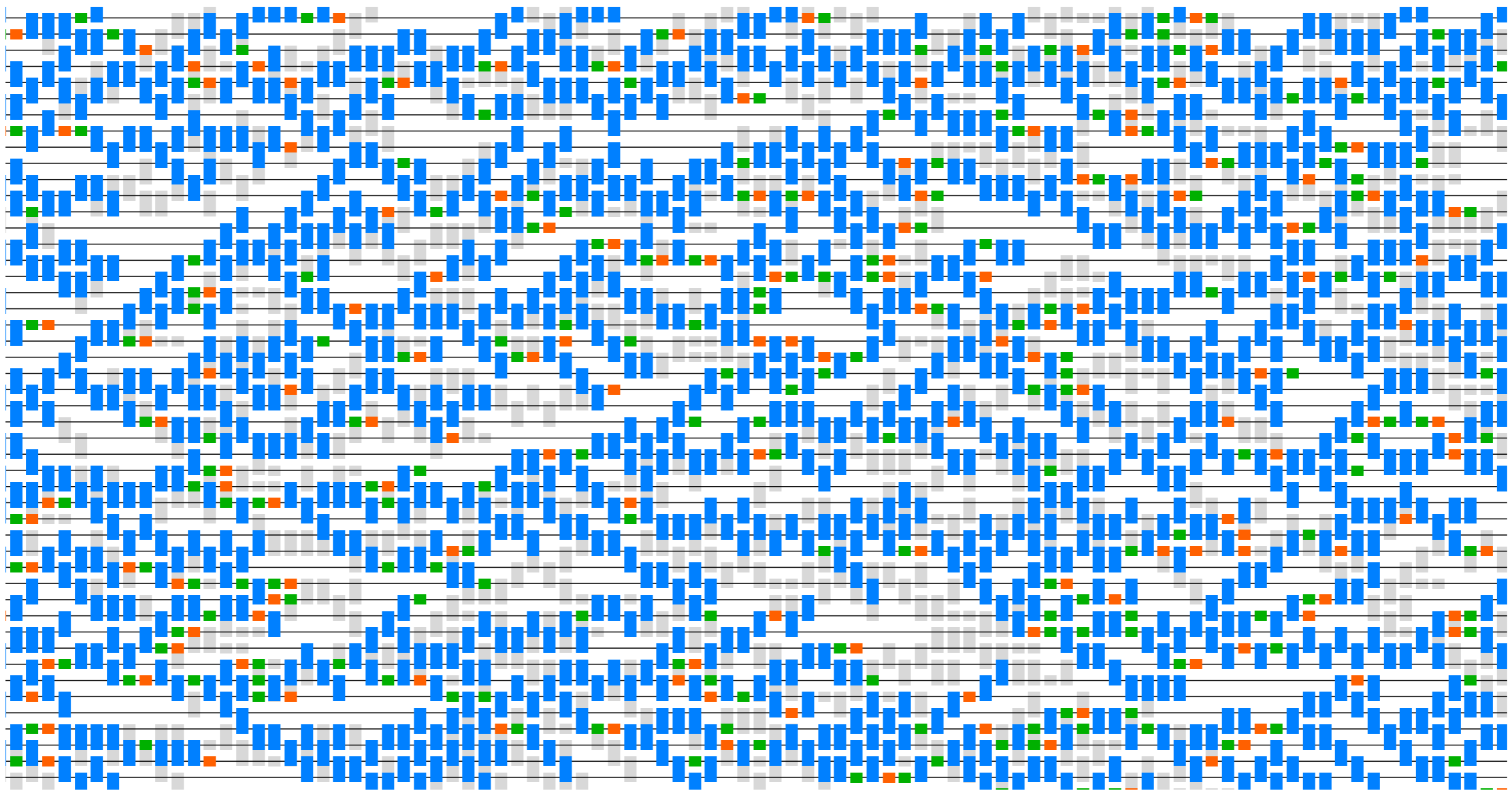
Optimiere

Quantenalgorithmen

durch neuronale

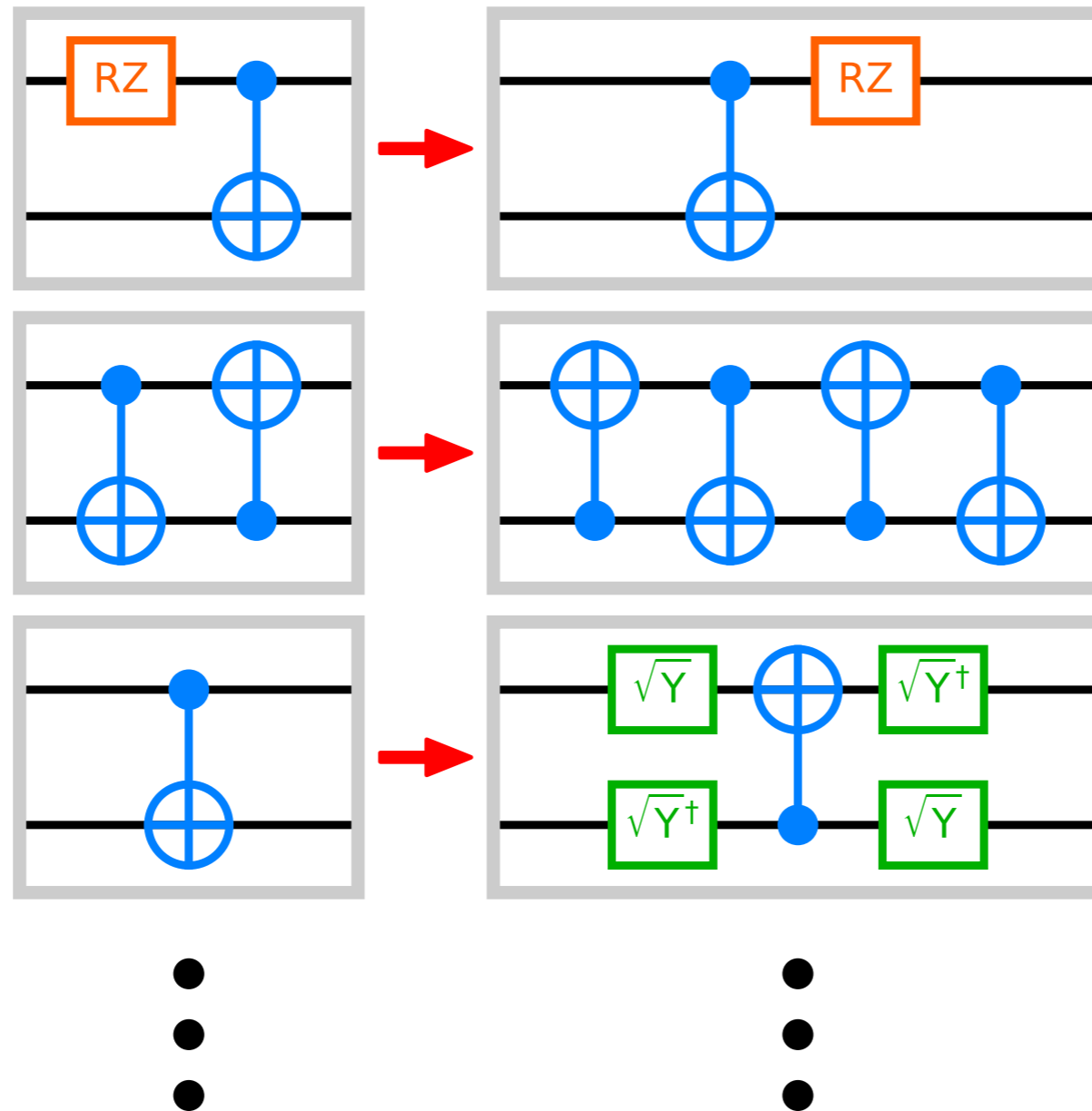
Netze!

qubit number

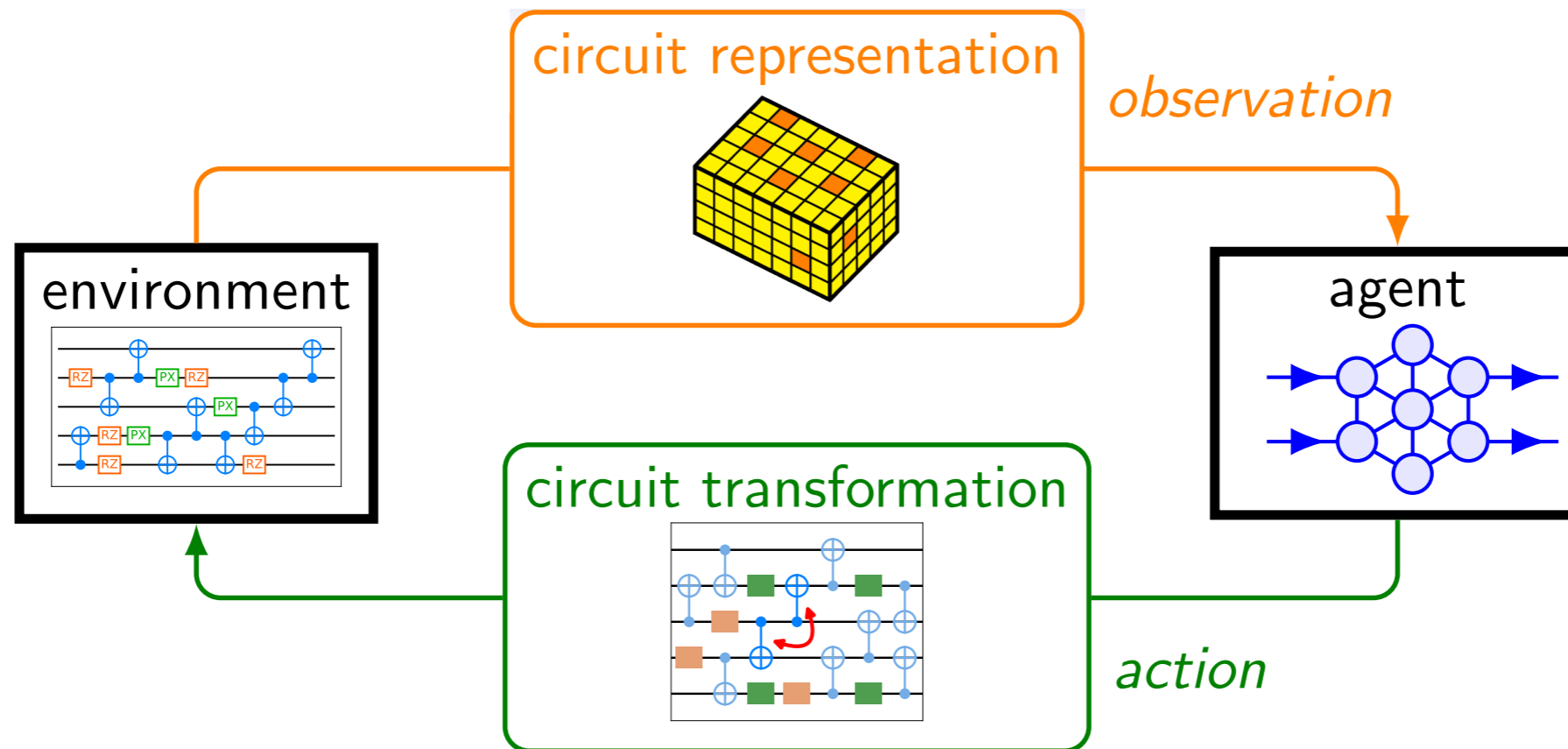


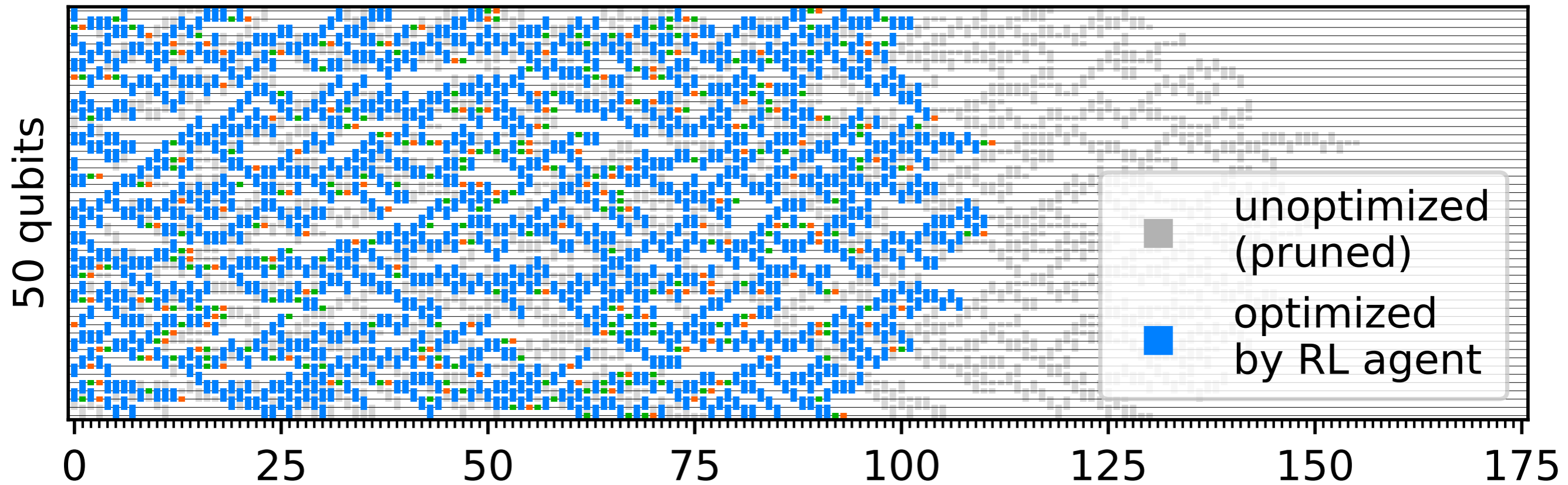
time

Transformationsregeln



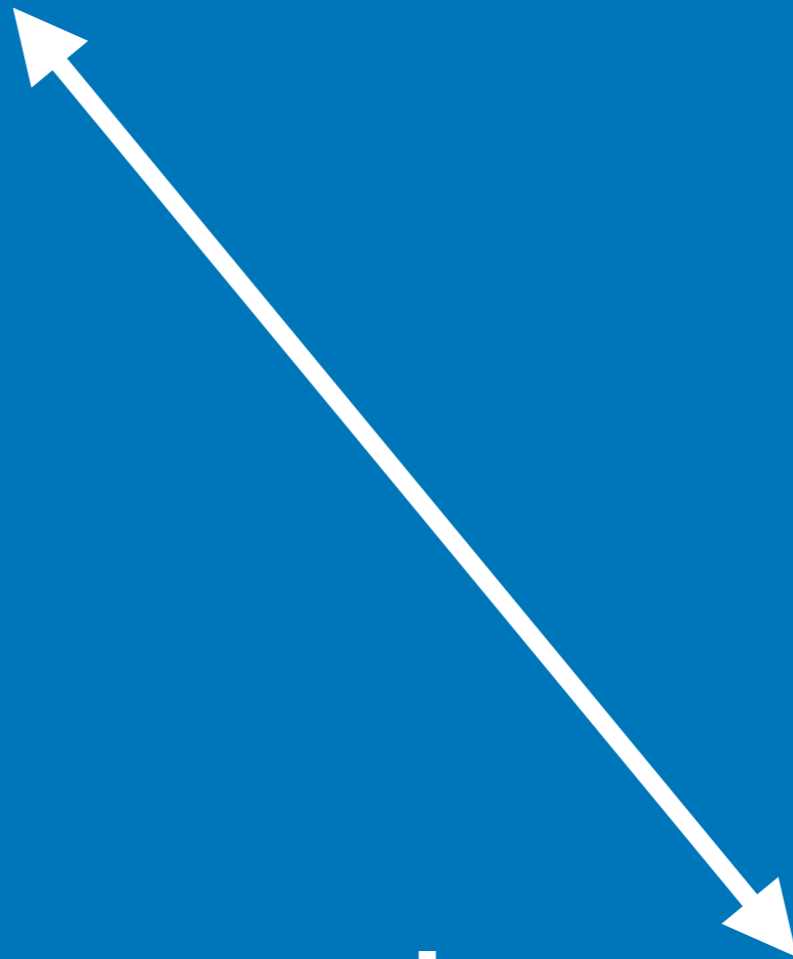
Verstärkendes Lernen



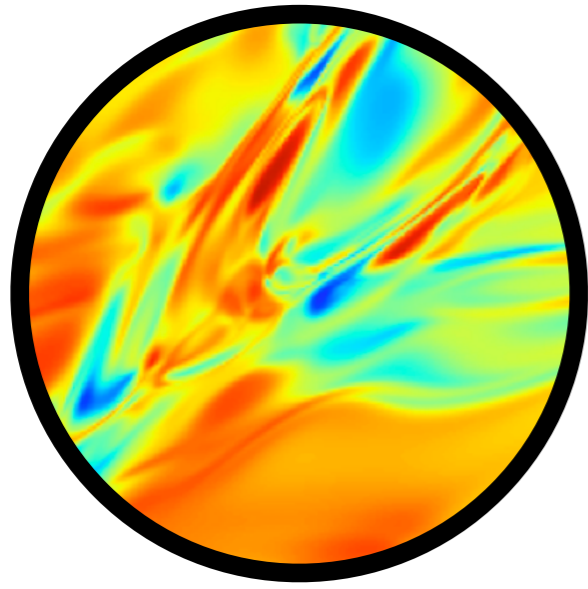


Fösel et al. 2021 (Zusammenarbeit mit Google Research)

Künstliche
Intelligenz



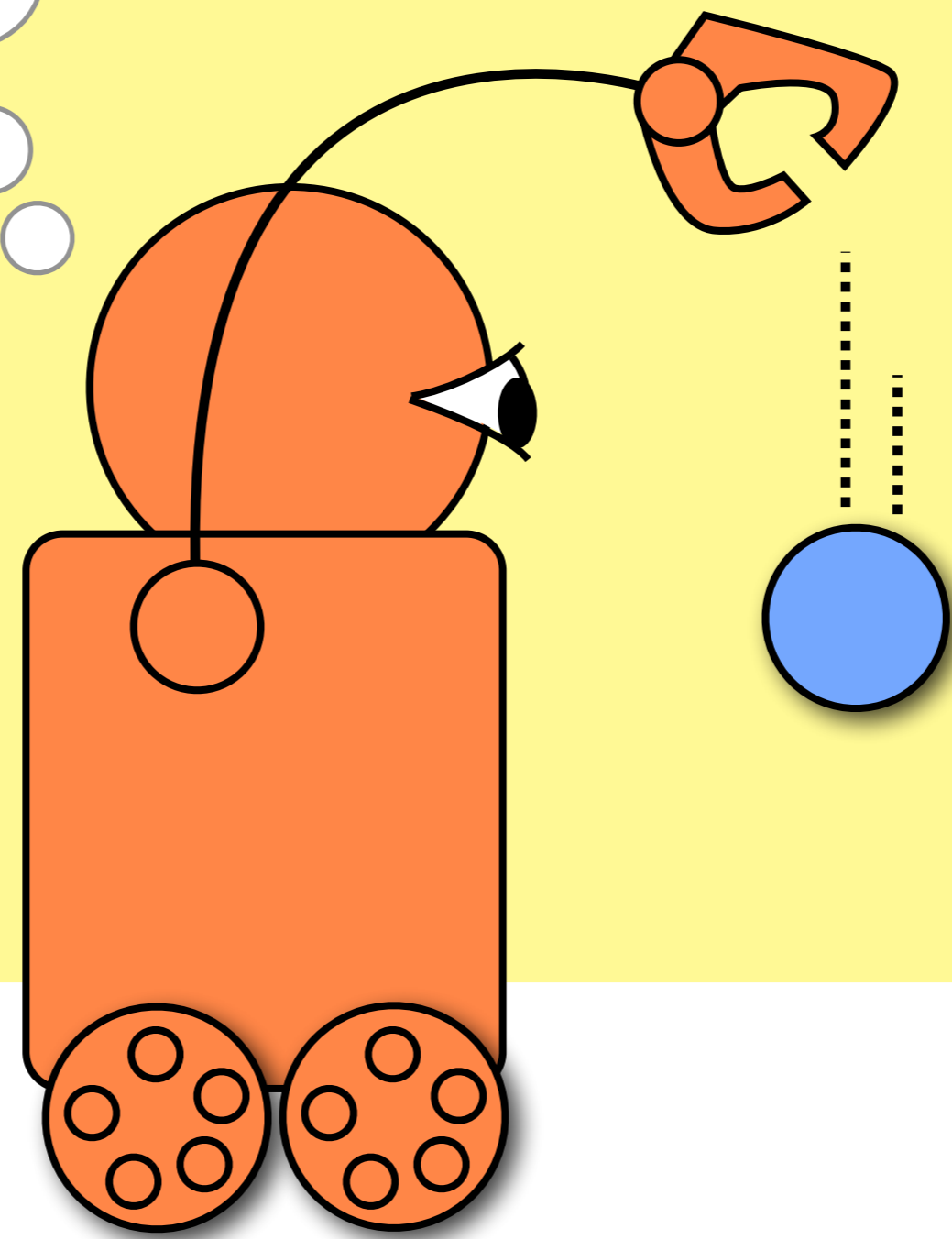
Quantentechnologien



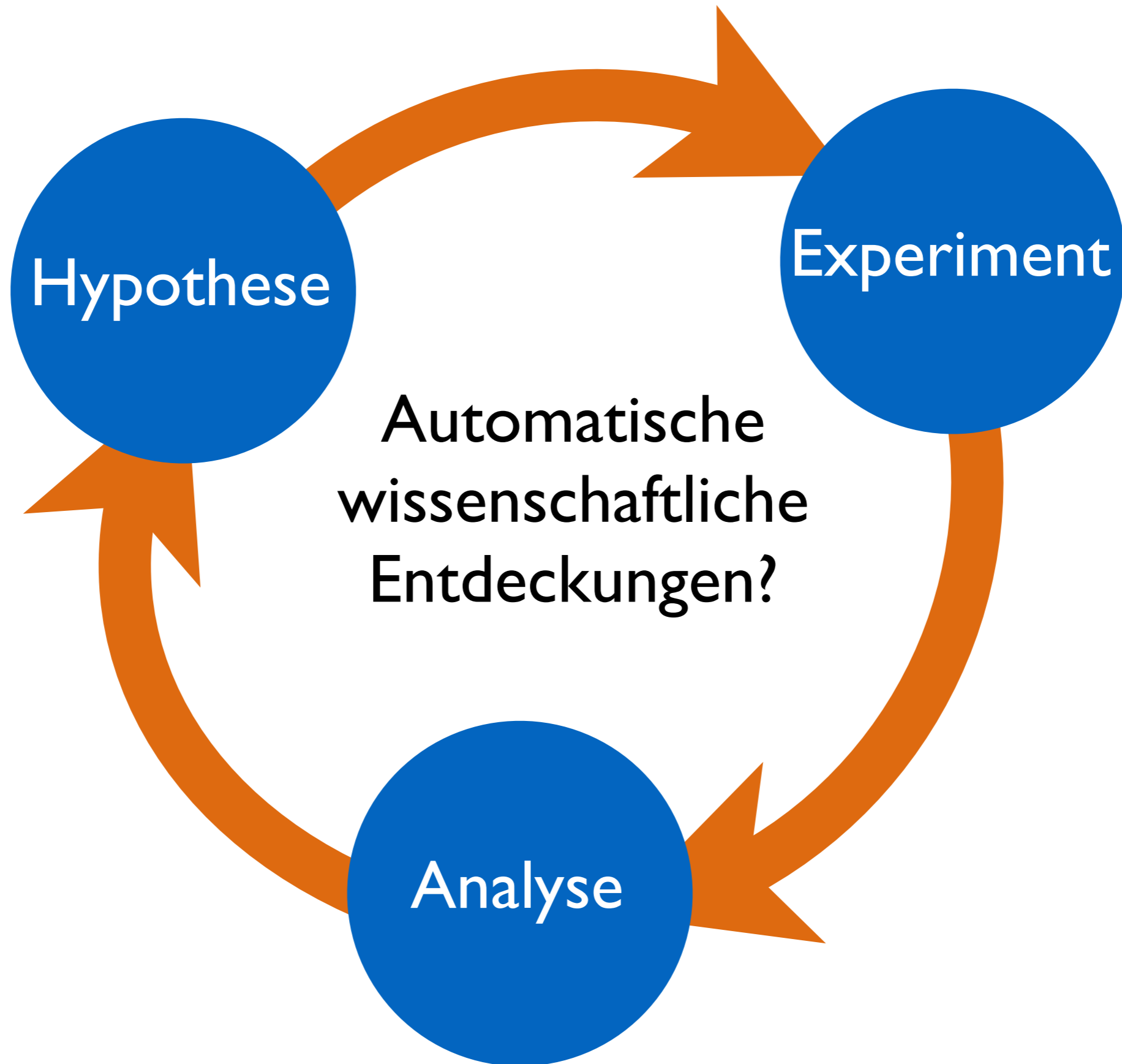
Ausblick

Künstliche Forschung?

$$x = \frac{1}{2}gt^2$$

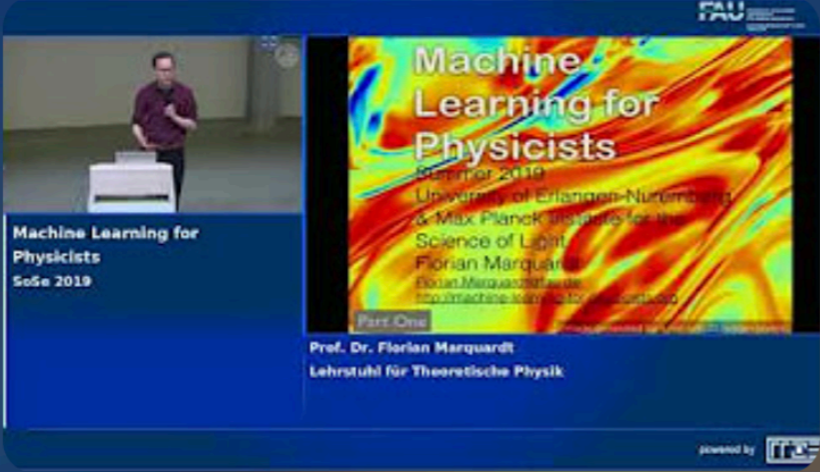


Die Zukunft?



Mehr zum maschinellen Lernen...

YouTube @florian_marquardt_physics

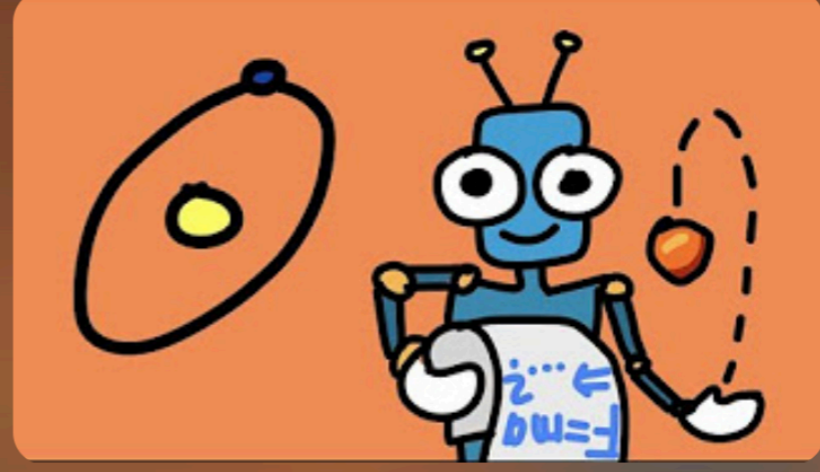


Machine Learning for Physicists (lecture series)

Florian Marquardt

Public ▾

11 videos 19,671 views Last updated on Apr 12, 2021



Advanced Machine Learning (lecture series)

Florian Marquardt

Public ▾

33 videos 13,552 views Last updated on Feb 11, 2022

Reviews

Krenn, Landgraf, Fösel, F.M. Phys. Rev. A 107, 010101 (2023)

Dawid et al, arXiv:2204.04198

<https://mpl.mpg.de/divisions/marquardt-division/machine-learning-for-physics-science-and-artificial-scientific-discovery>

"Moderne Physik am
Samstagmorgen" in
Erlangen

moderne-physik.de

(inkl. Videos zu
manchen Vorträgen)