Klassische Stromnetzberechnung in Kombination mit künstlicher Intelligenz zur Analyse und Diagnose von Stromverteilnetzen

Andreas Winter, Prof. Dr. Michael Igel
Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes

Dr. Boris Brandherm
Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH

Prof. Dr. Peter Schegner
Technische Universität Dresden

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

GridAnalysis

Andreas Winter, Boris Brandherm, Michael Igel, Peter Schegner

Klassische Stromnetzberechnung in Kombination mit künstlicher Intelligenz zur Analyse und Diagnose von Stromverteilnetzen

Tutorial Schutz- und Leittechnik: Online Preview 2022

Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH

htw saar

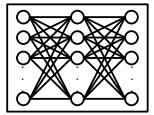
Stadtwerke Saarlouis
Mit Energie. Mit Sicherheit. Mit uns.

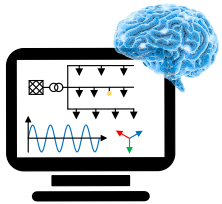
VSE Verteilnetz GmbH

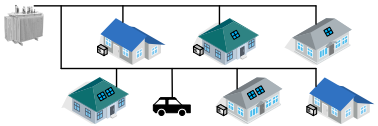
Foto: Colourbox

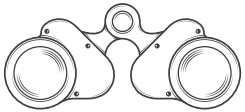
Inhalt

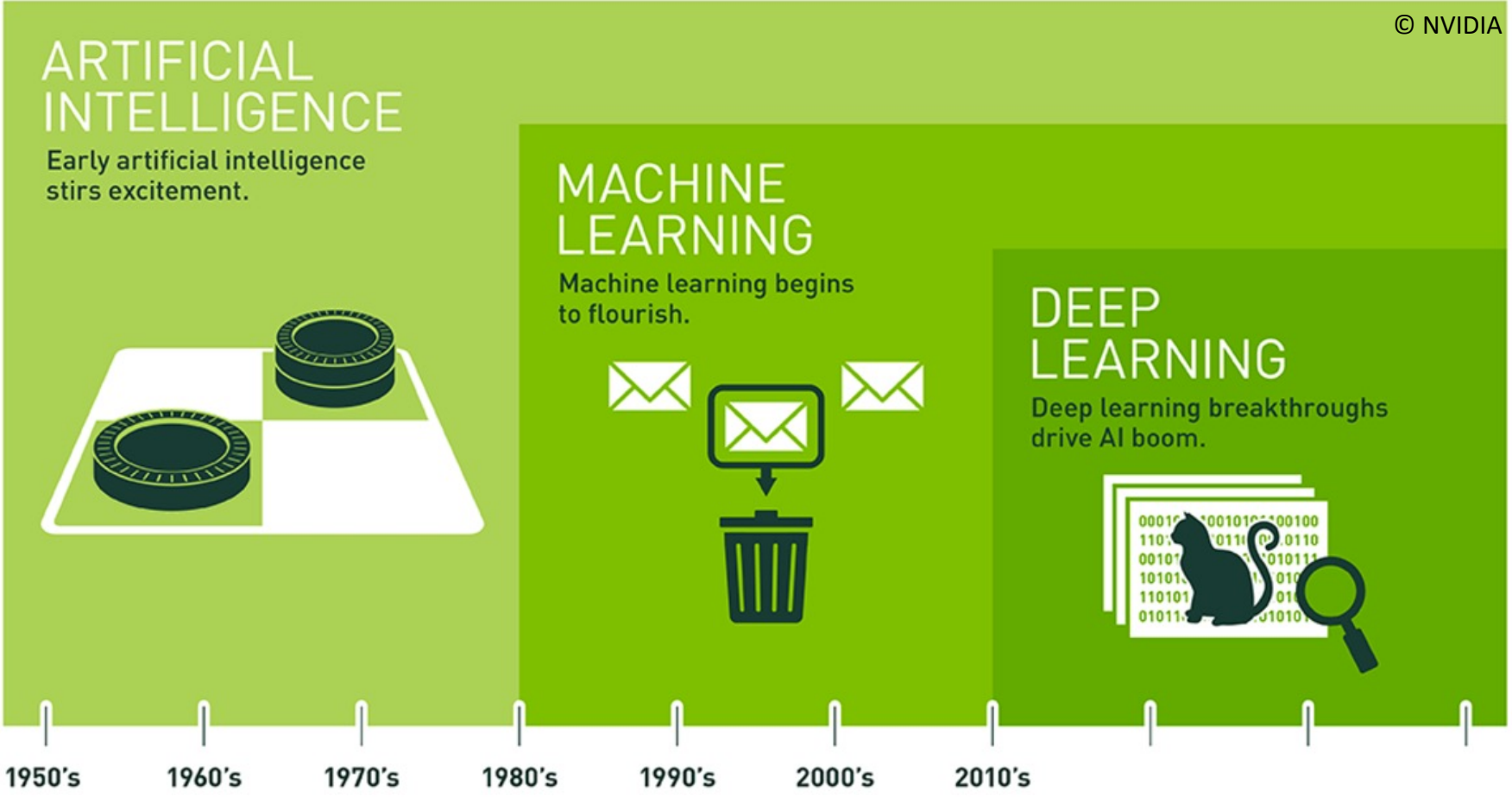
- Grundlagen Künstliche Neuronale Netze (KNN)
- KI-basierte Netzsimulation
- Anwendung der KI-basierten Netzsimulation
- KI in der Netzschutztechnik
- Zusammenfassung und Ausblick





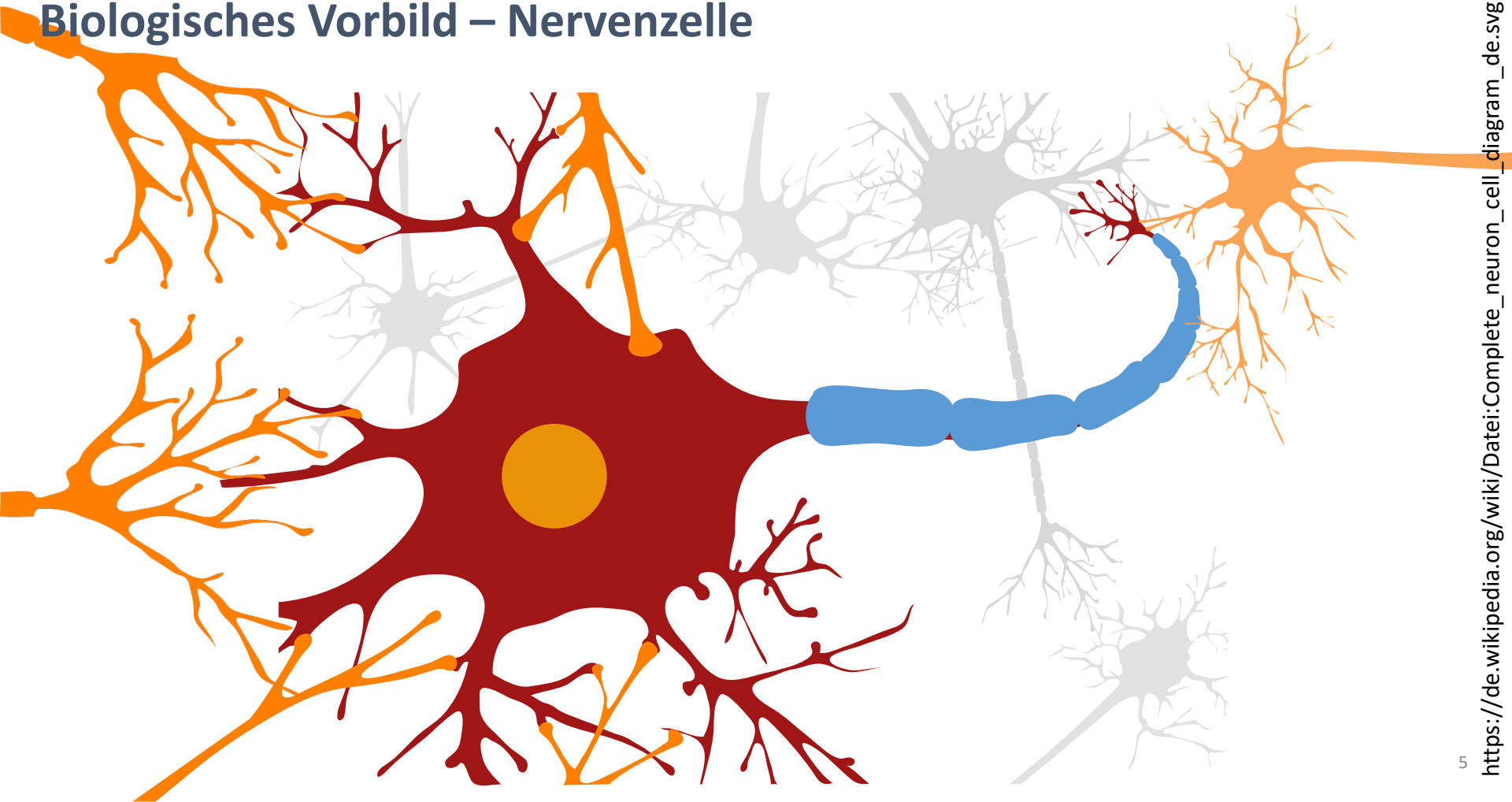






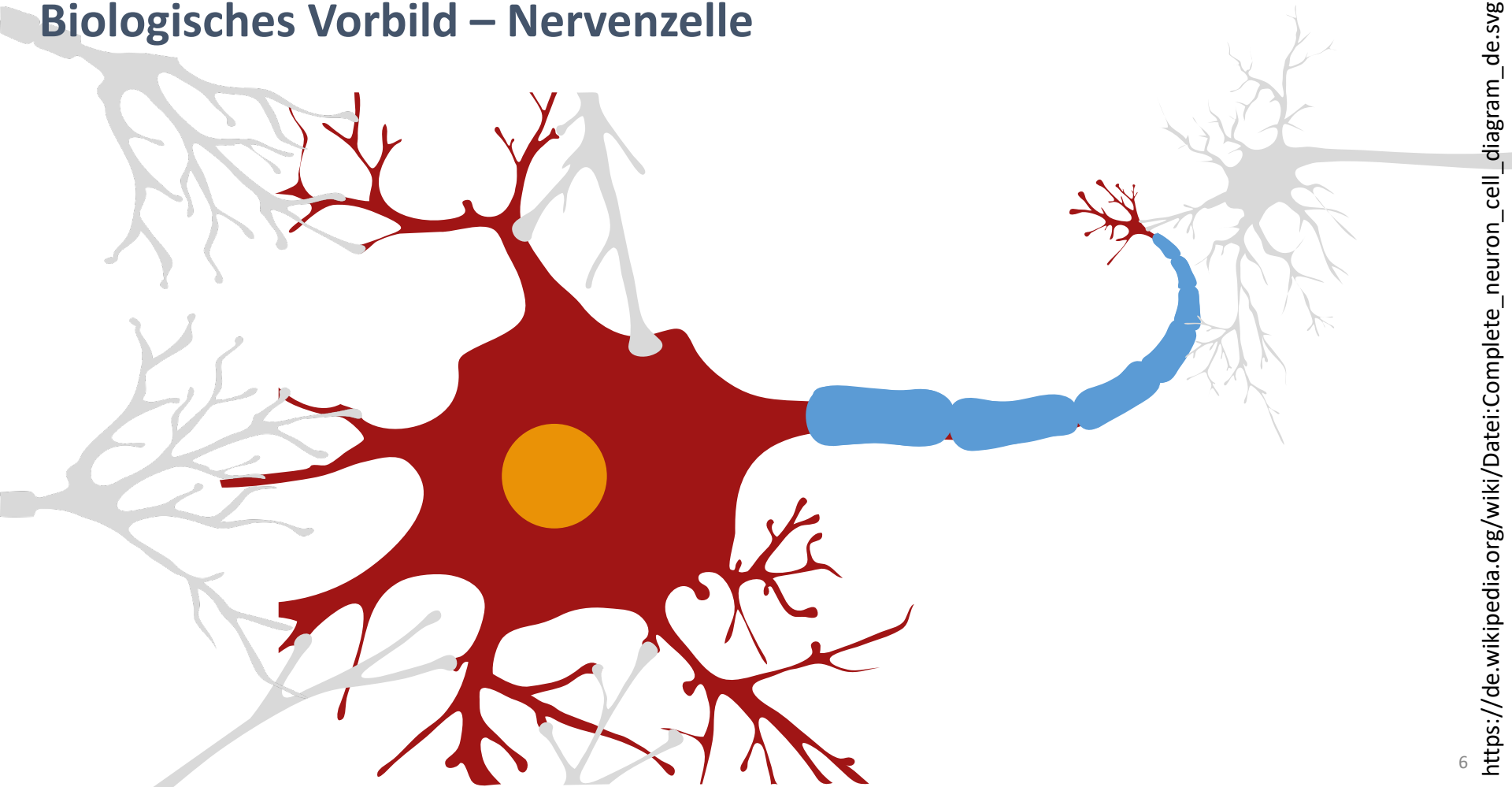
Der Ursprung der KI reicht bis in die 1950er-Jahre zurück. Seit einem **frühen Anflug von Optimismus** hat die KI **Höhen und Tiefen durchlebt**. In den letzten Jahren haben nun kleinere Teilbereiche der Künstlichen Intelligenz –zunächst das maschinelle Lernen, dann Deep Learning– **immer größere Umwälzungen** bewirkt.

Biologisches Vorbild – Nervenzelle



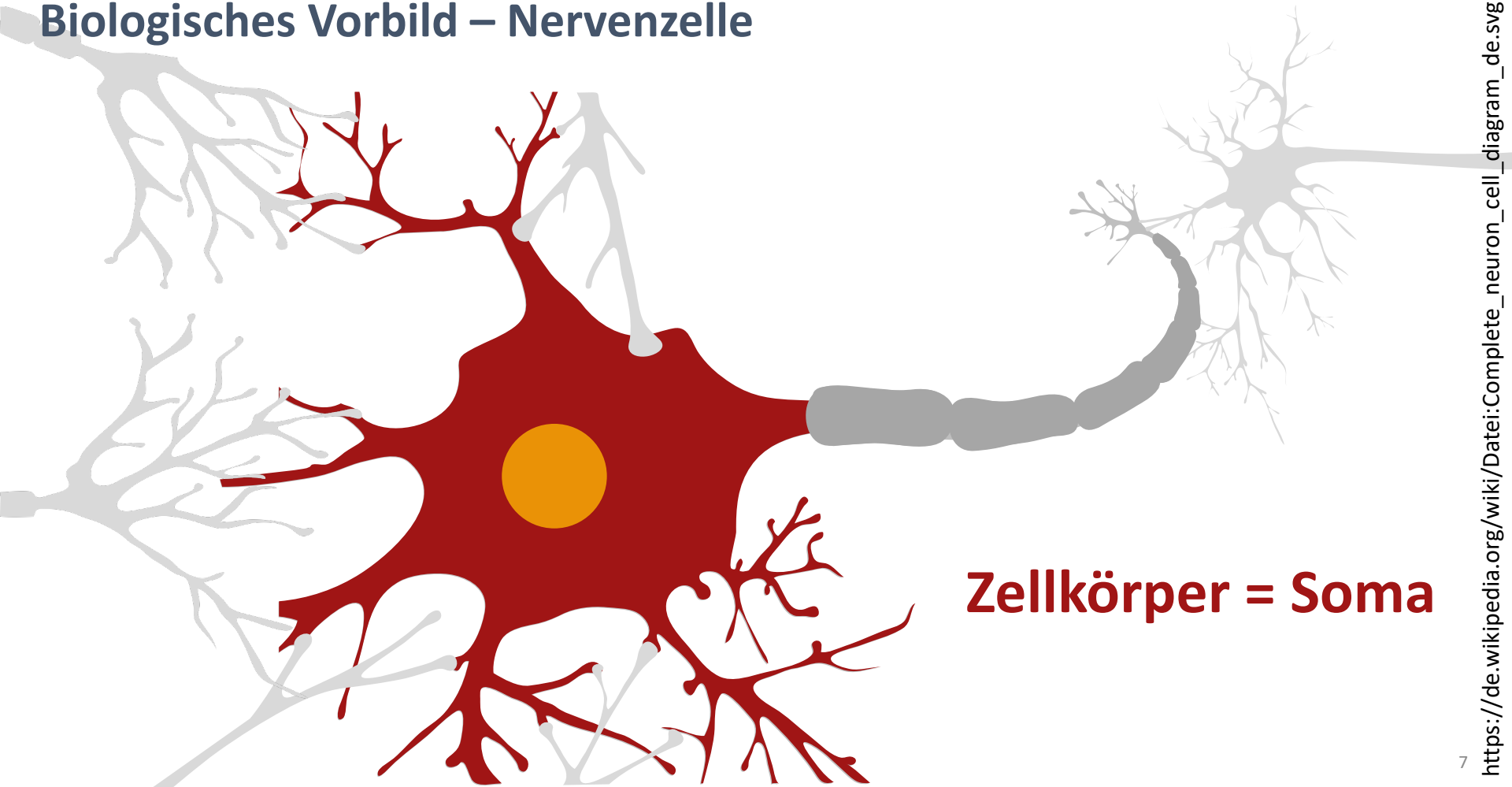
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle



https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

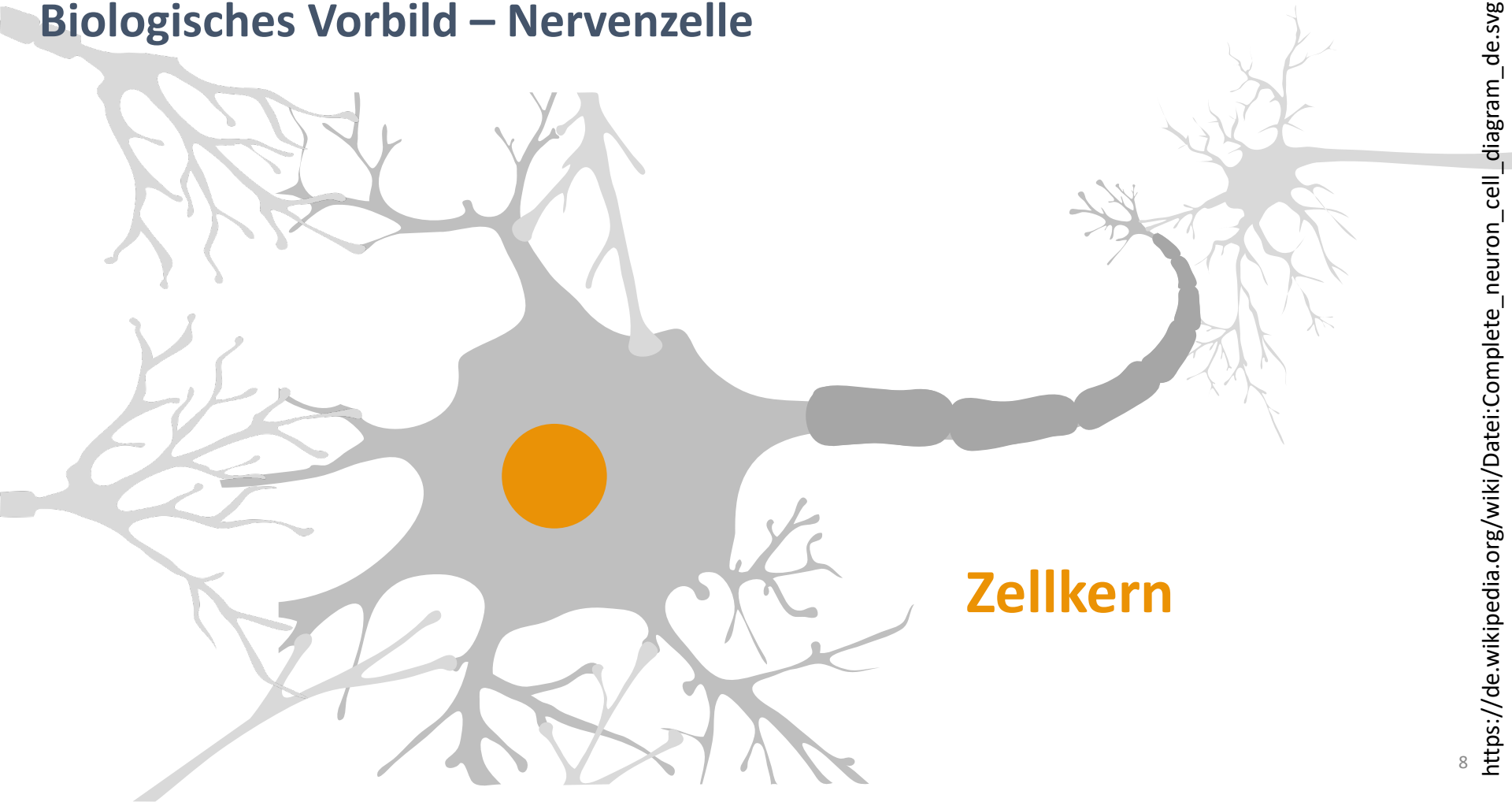
Biologisches Vorbild – Nervenzelle



Zellkörper = Soma

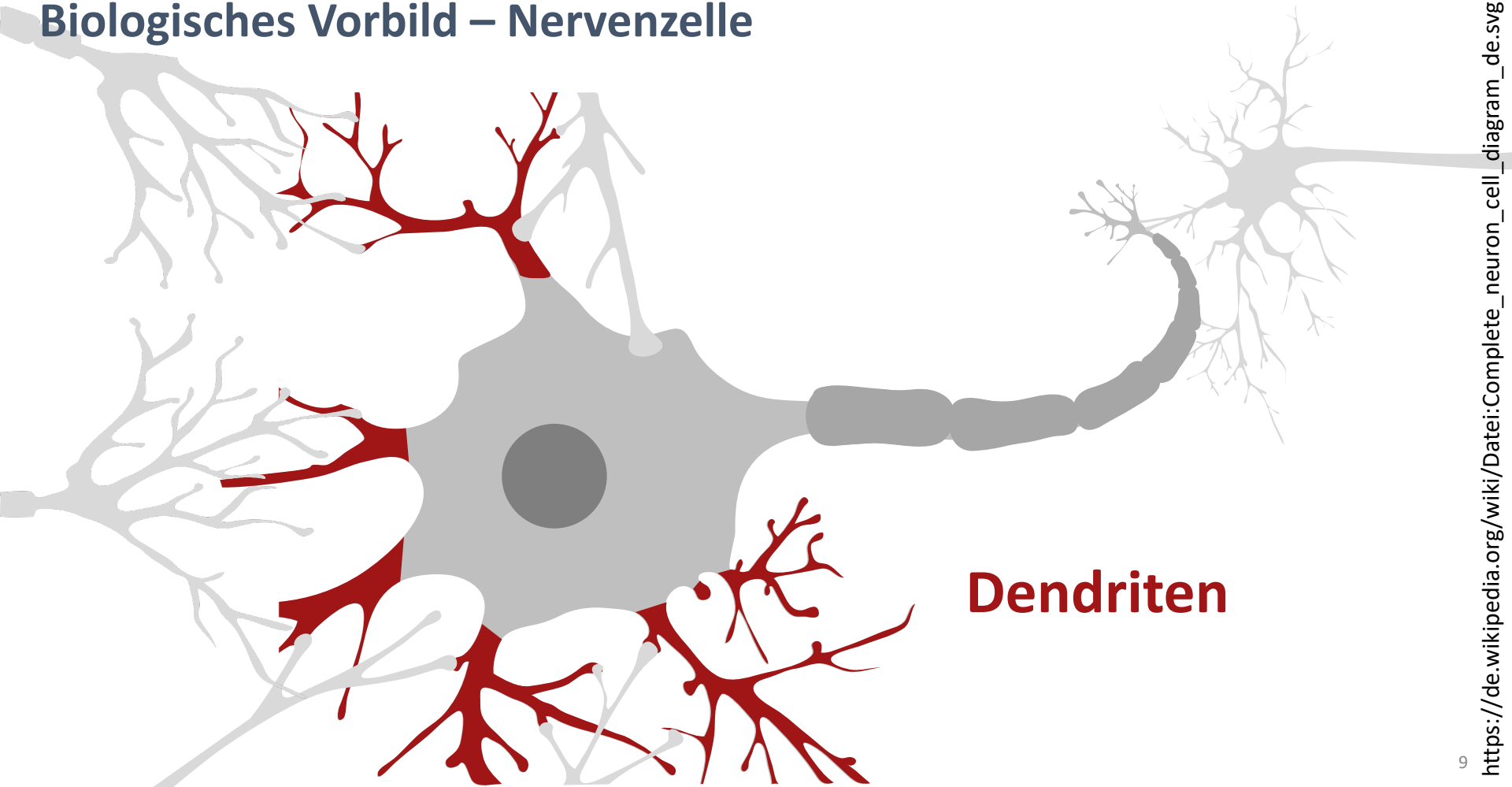
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle



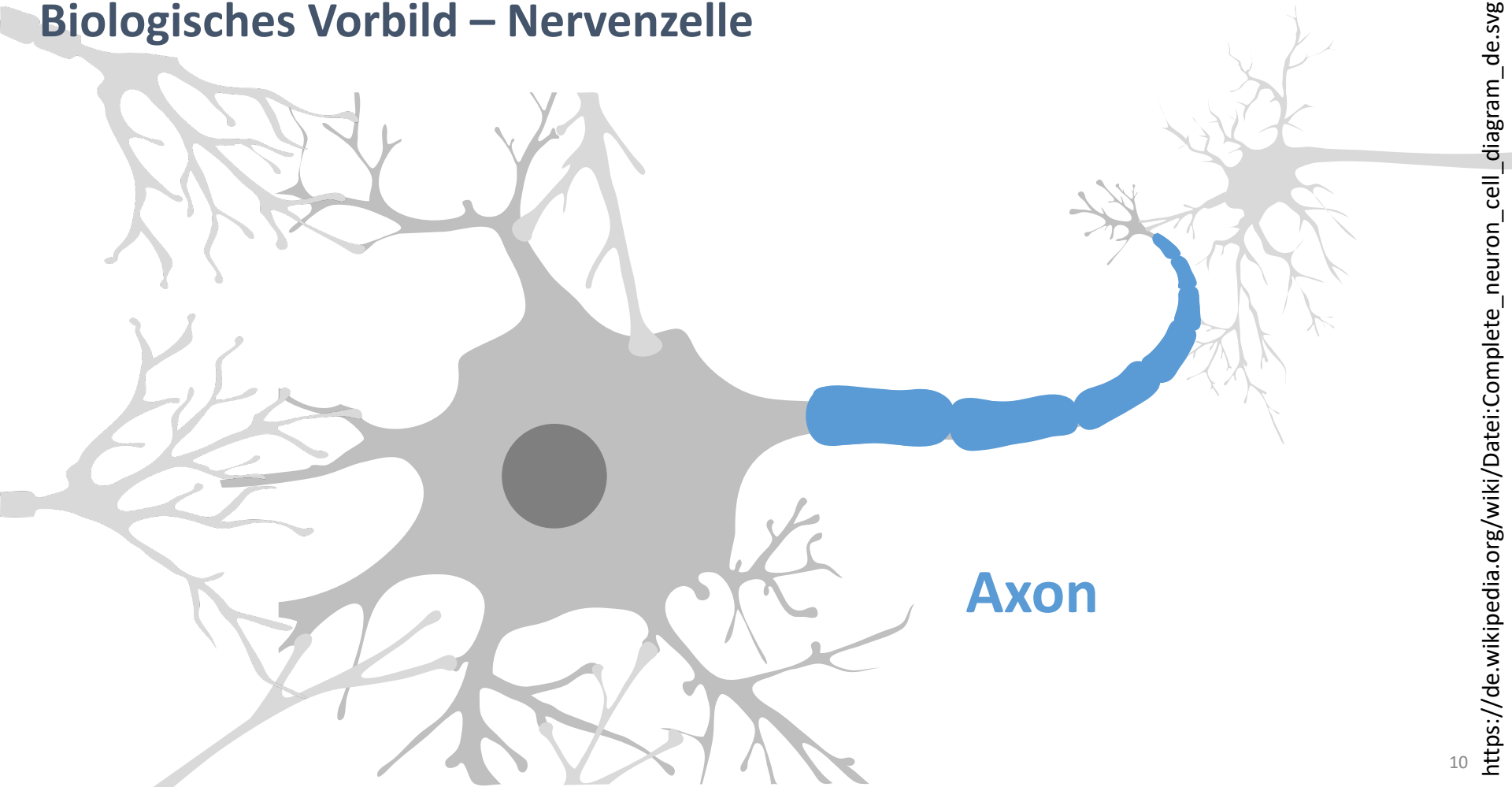
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle



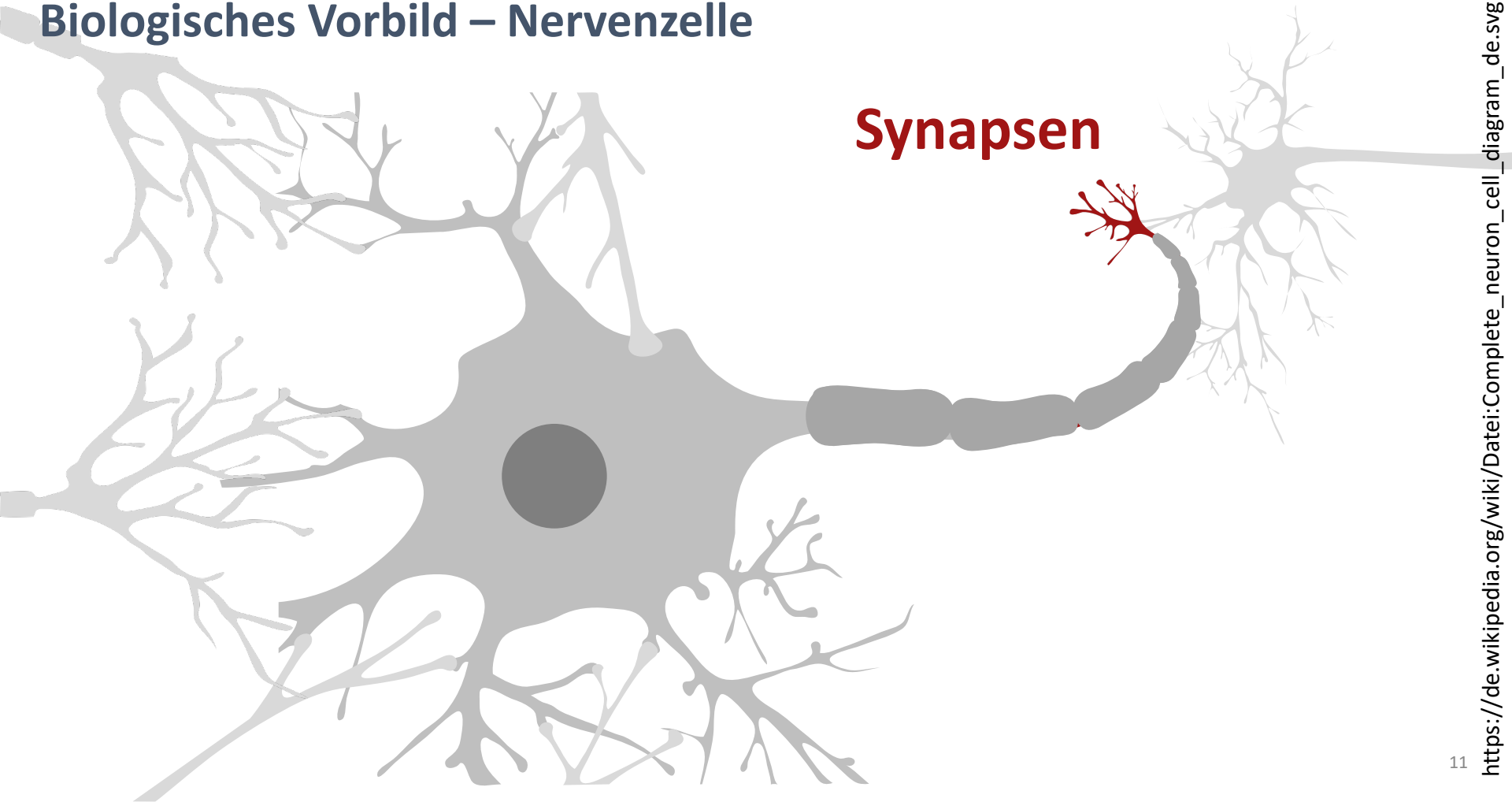
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle



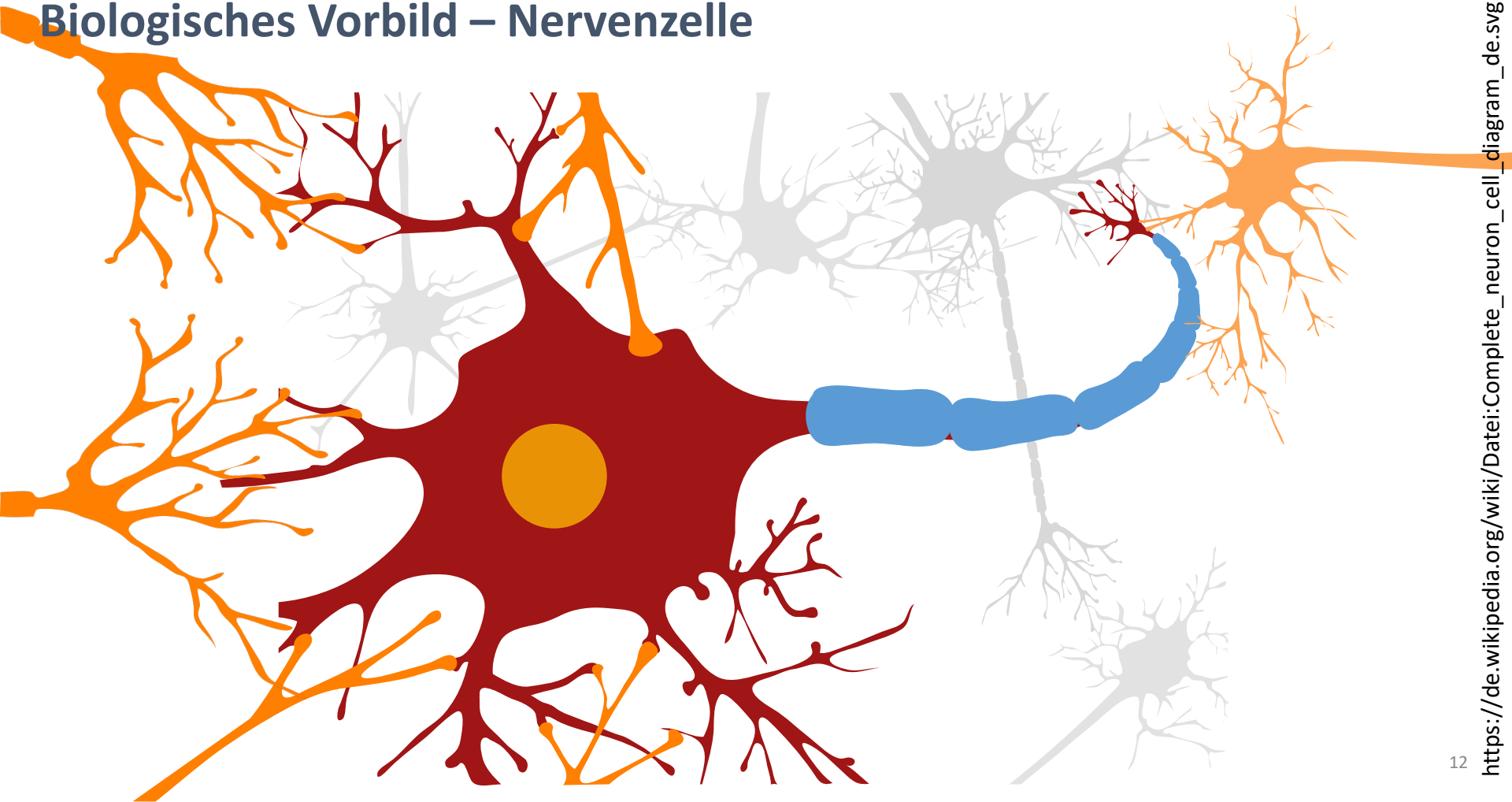
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle



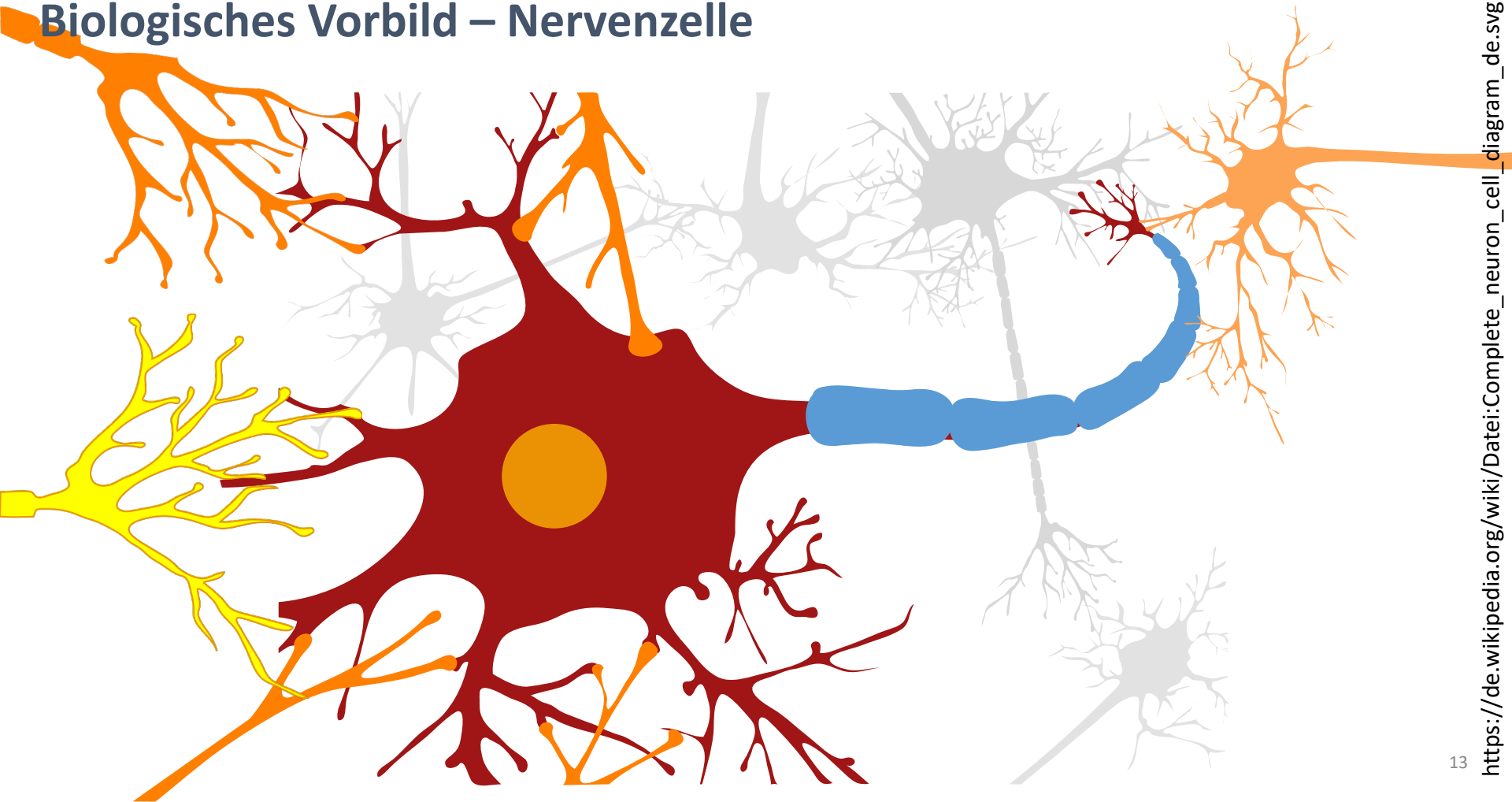
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle



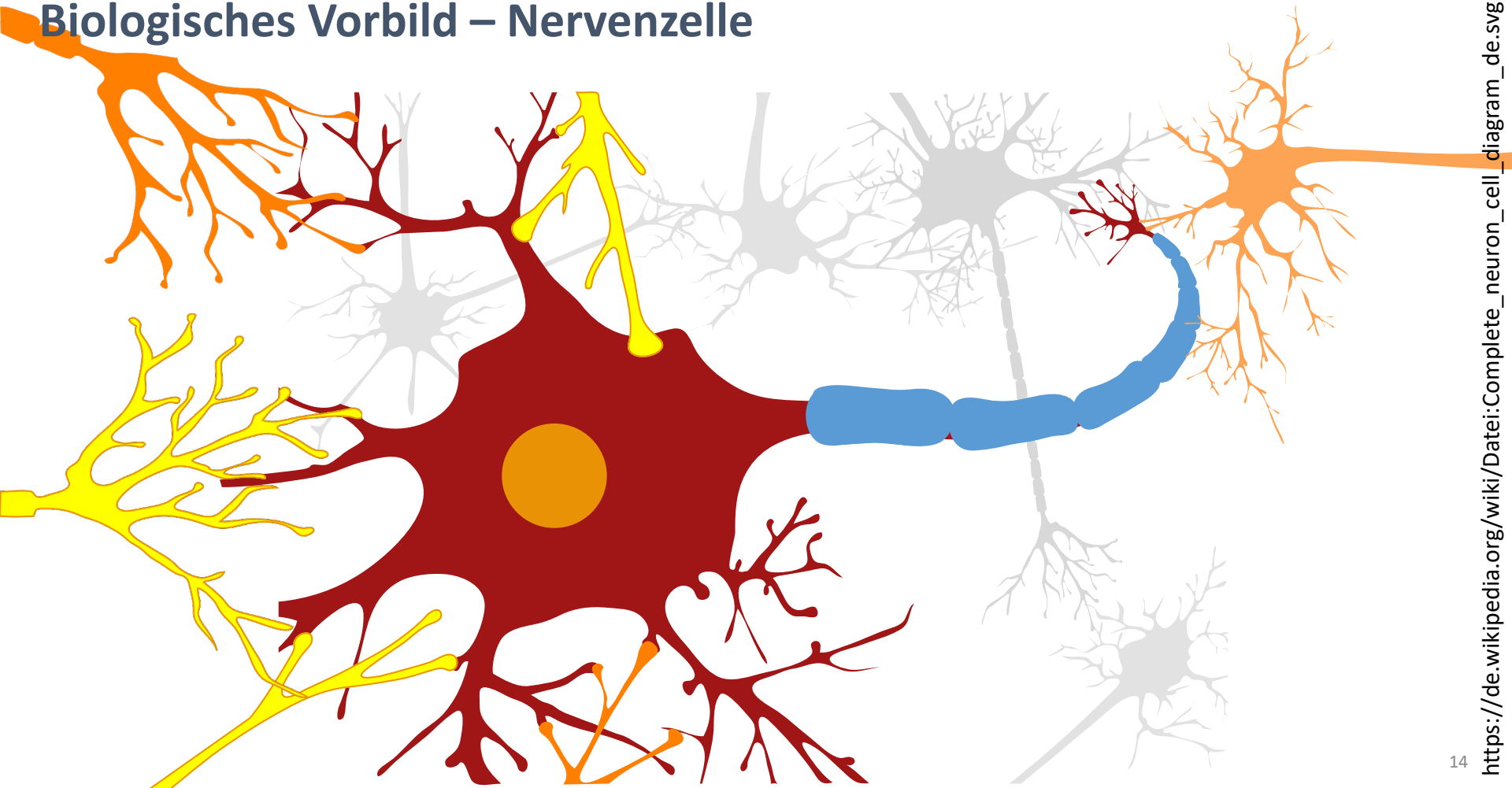
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle



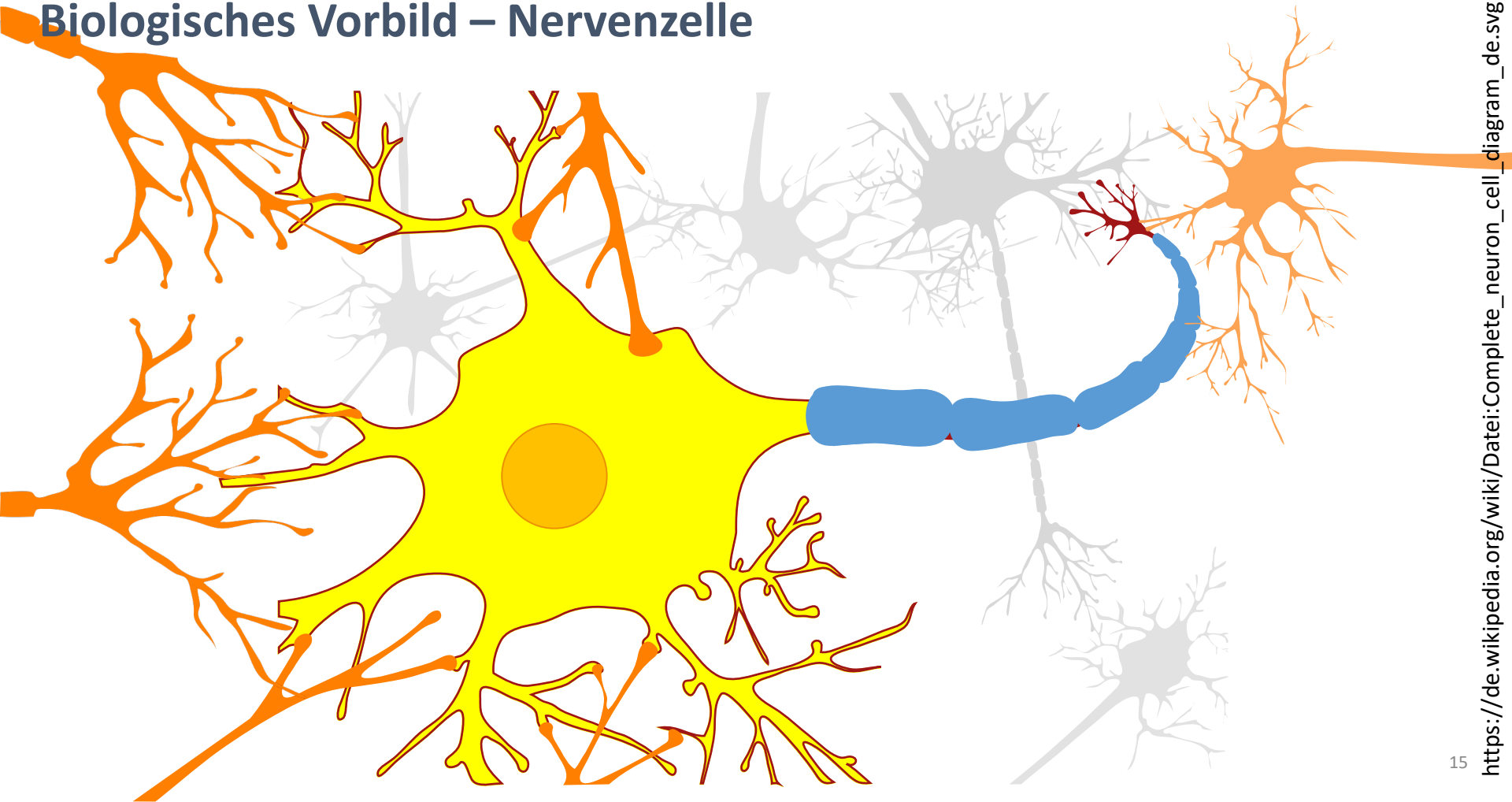
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle



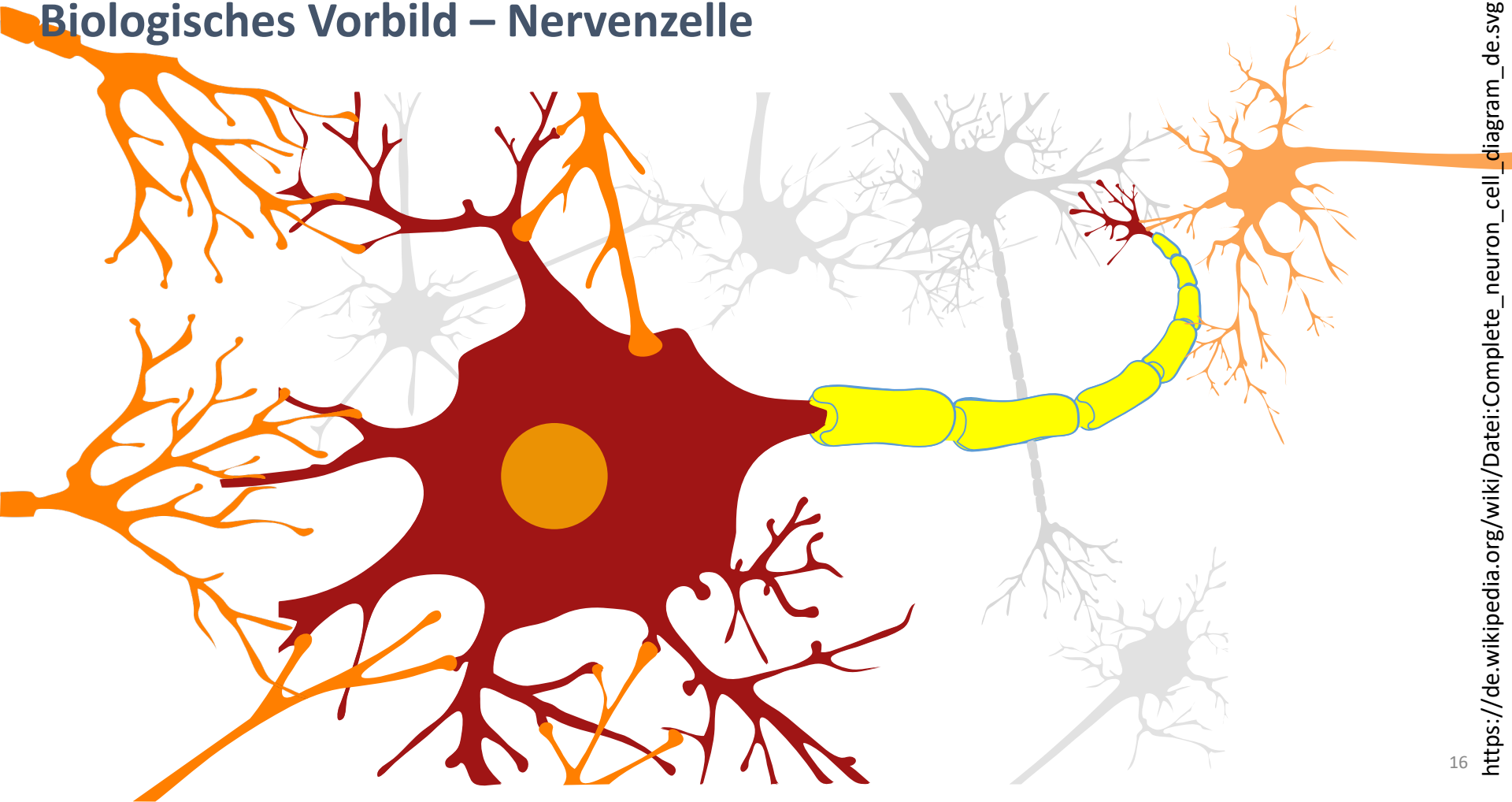
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle



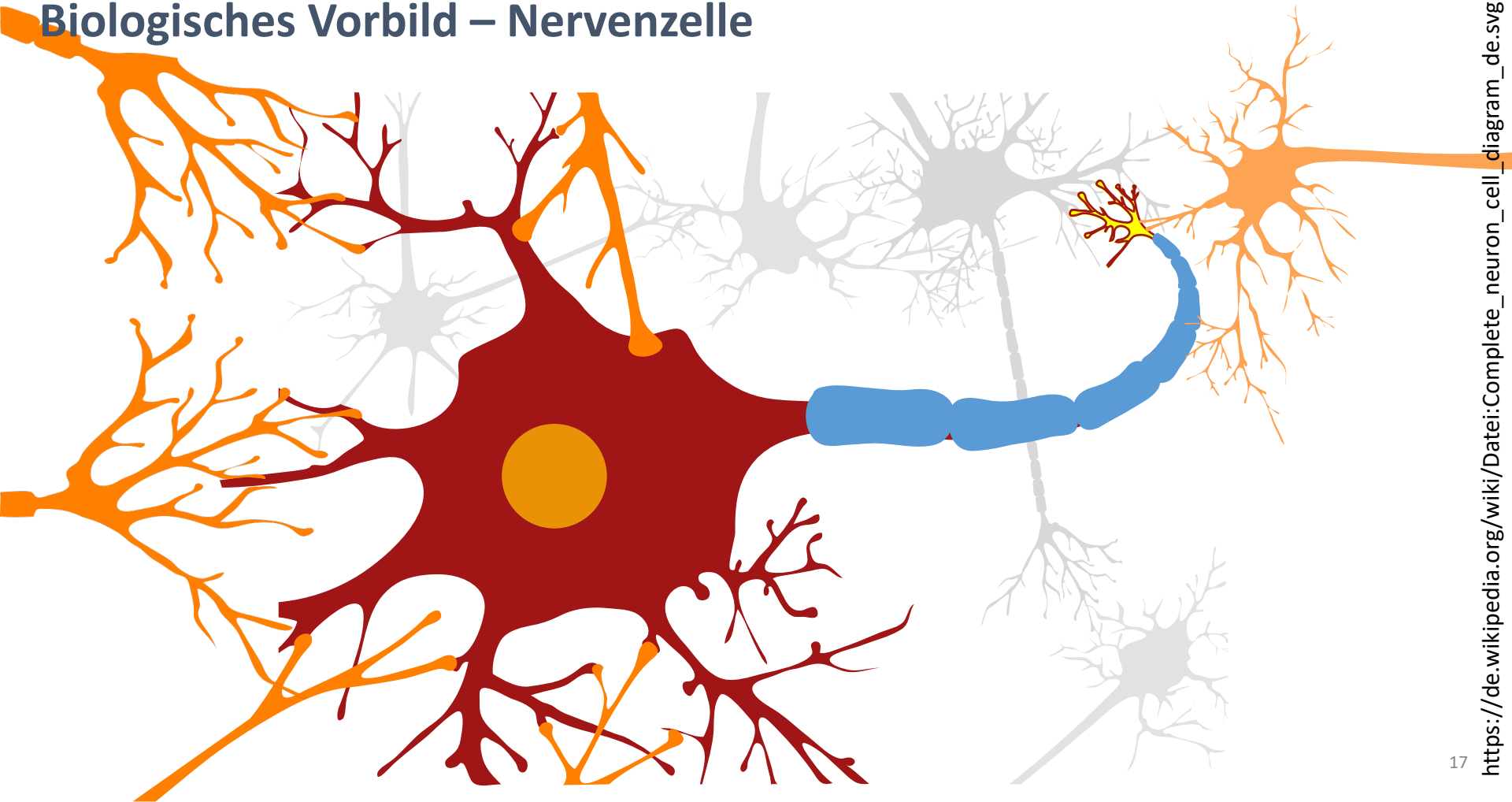
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle



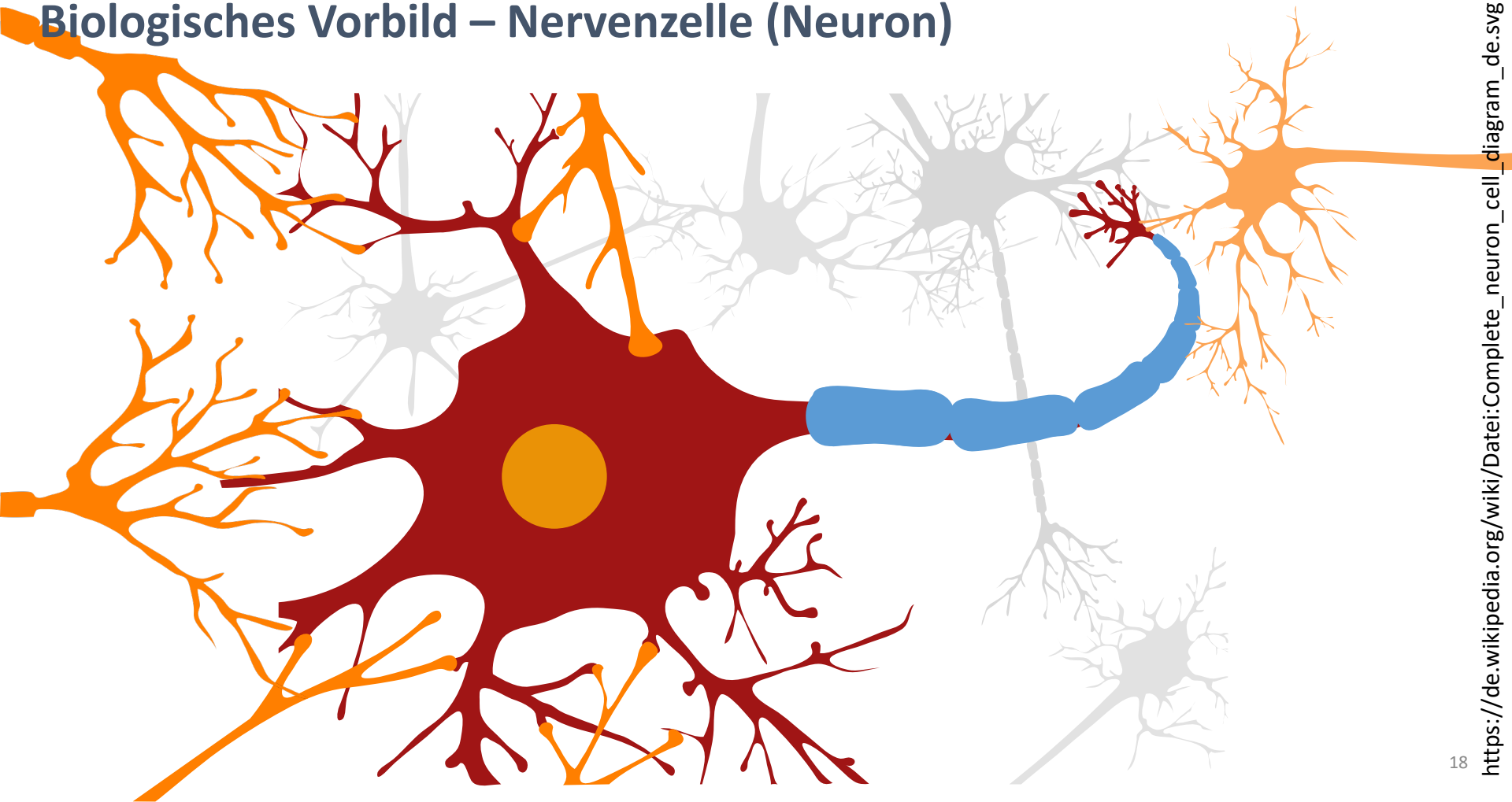
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle



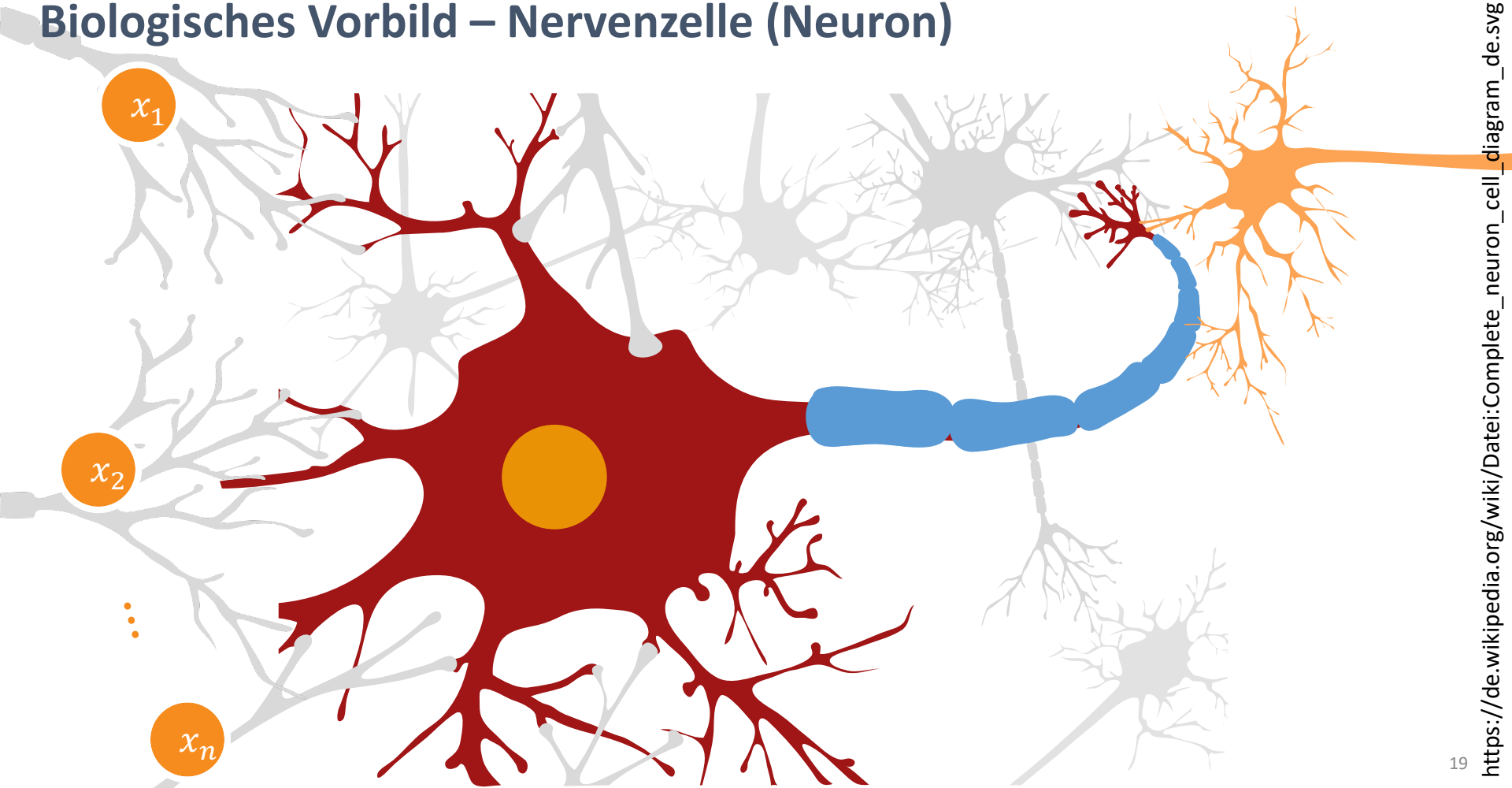
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle (Neuron)



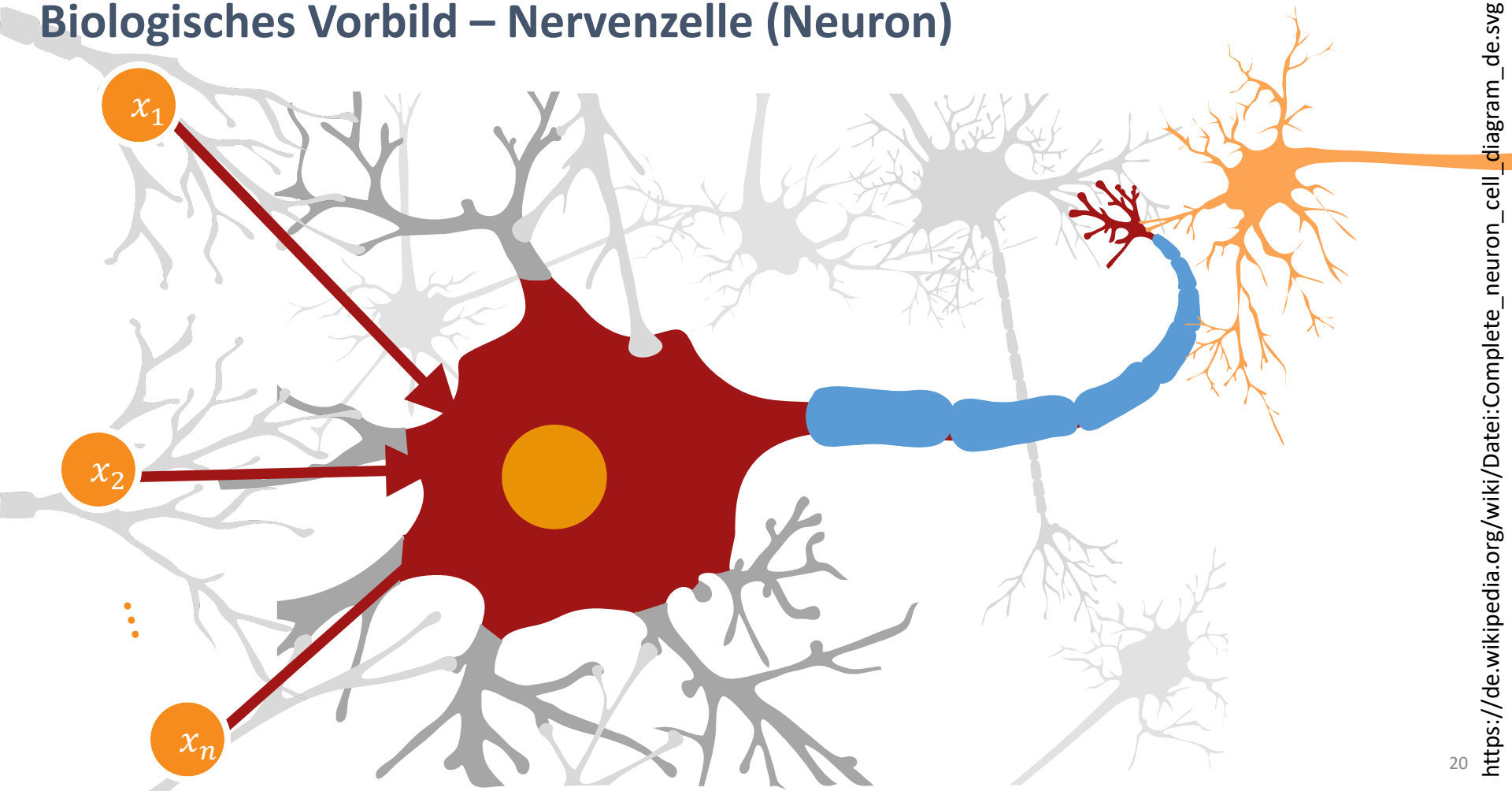
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle (Neuron)



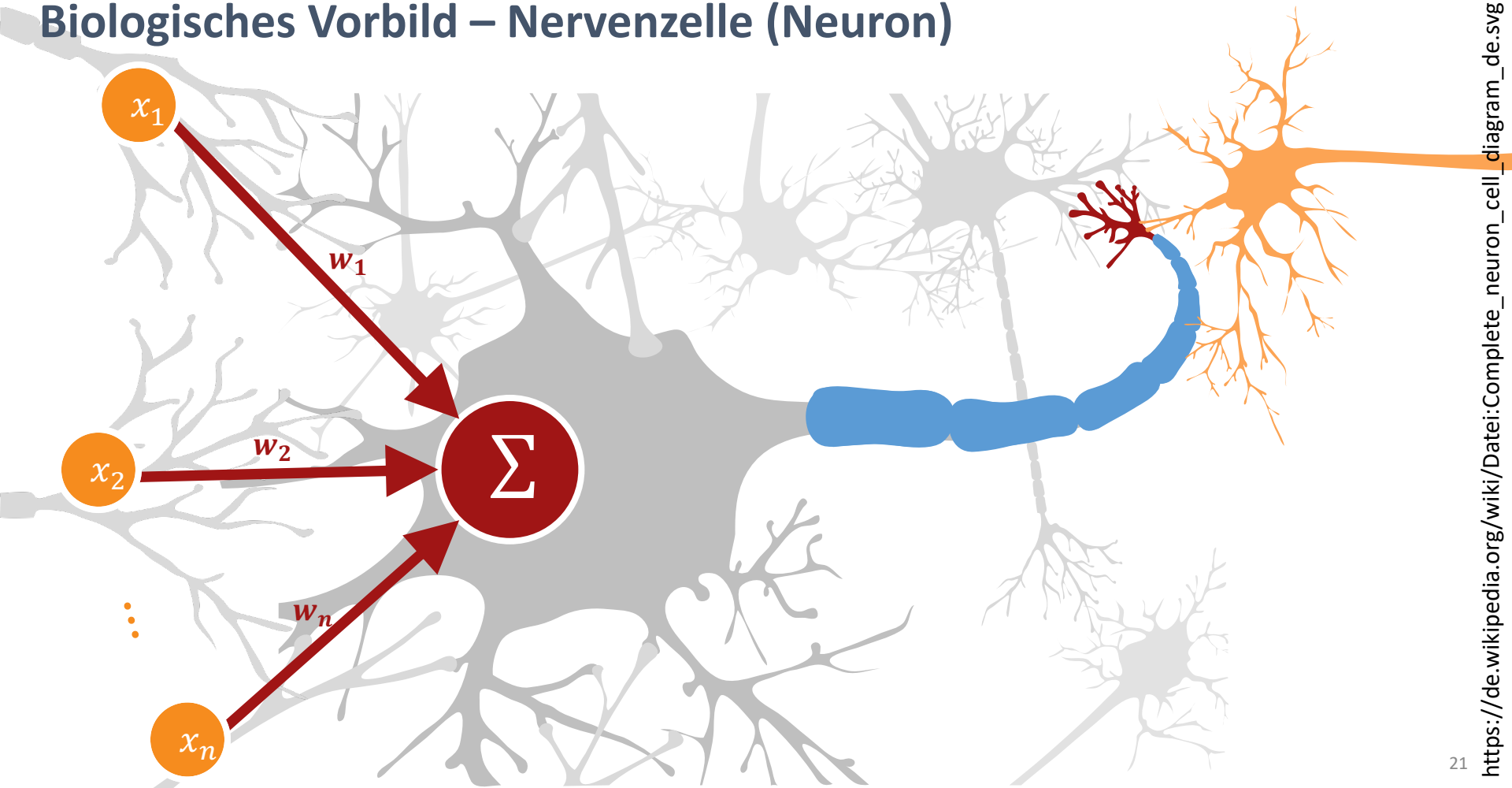
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle (Neuron)



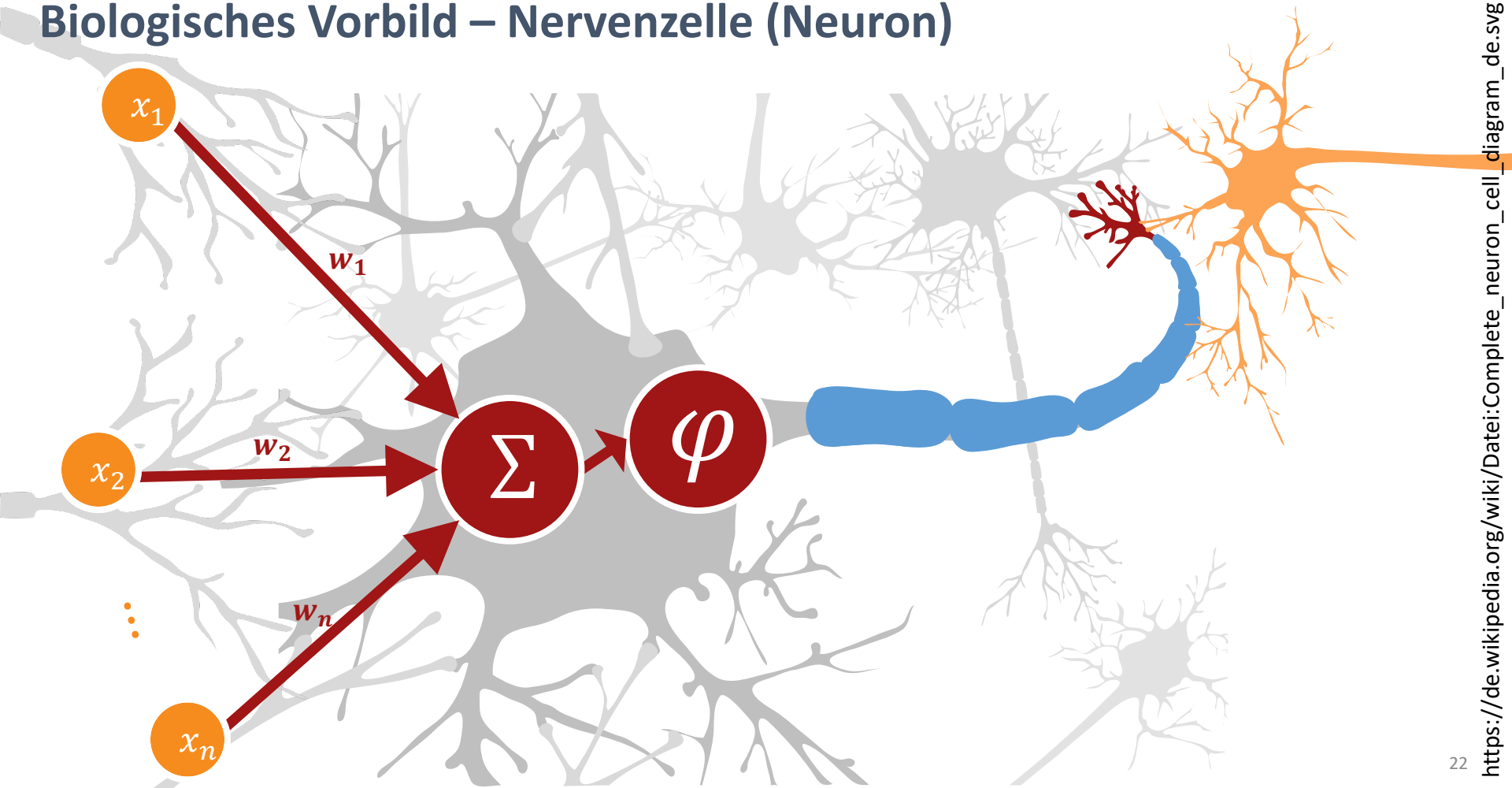
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle (Neuron)



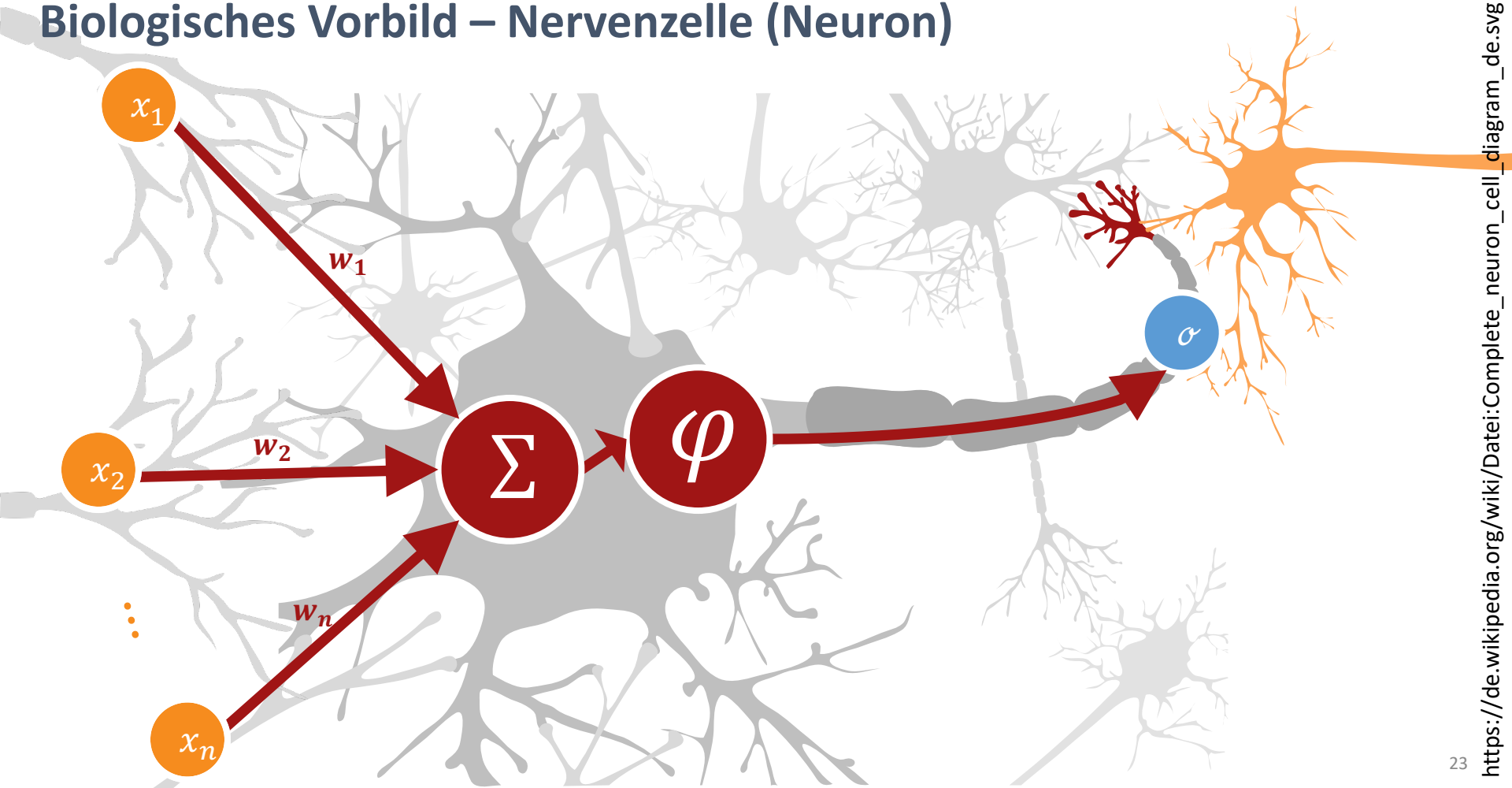
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle (Neuron)



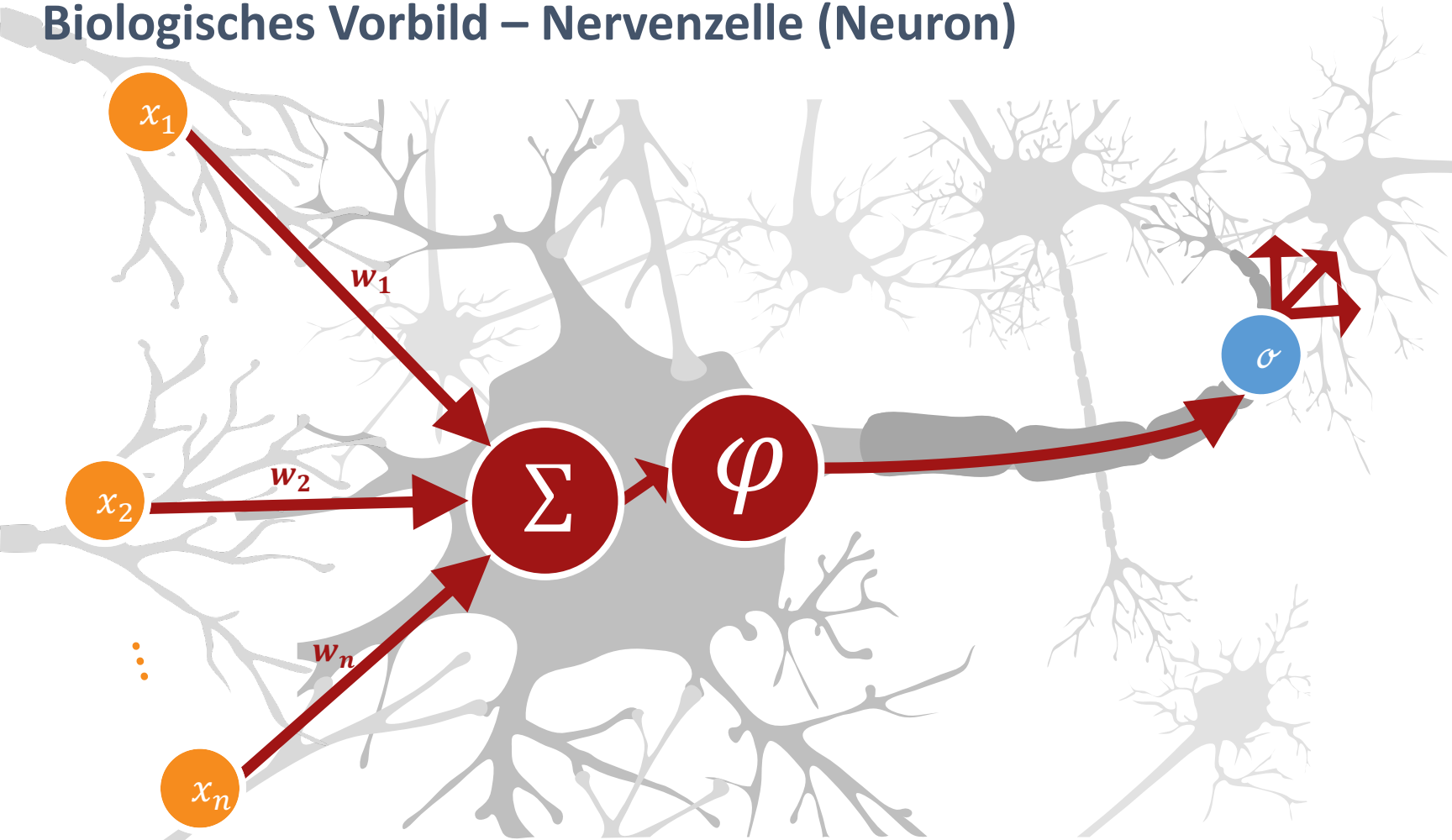
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle (Neuron)



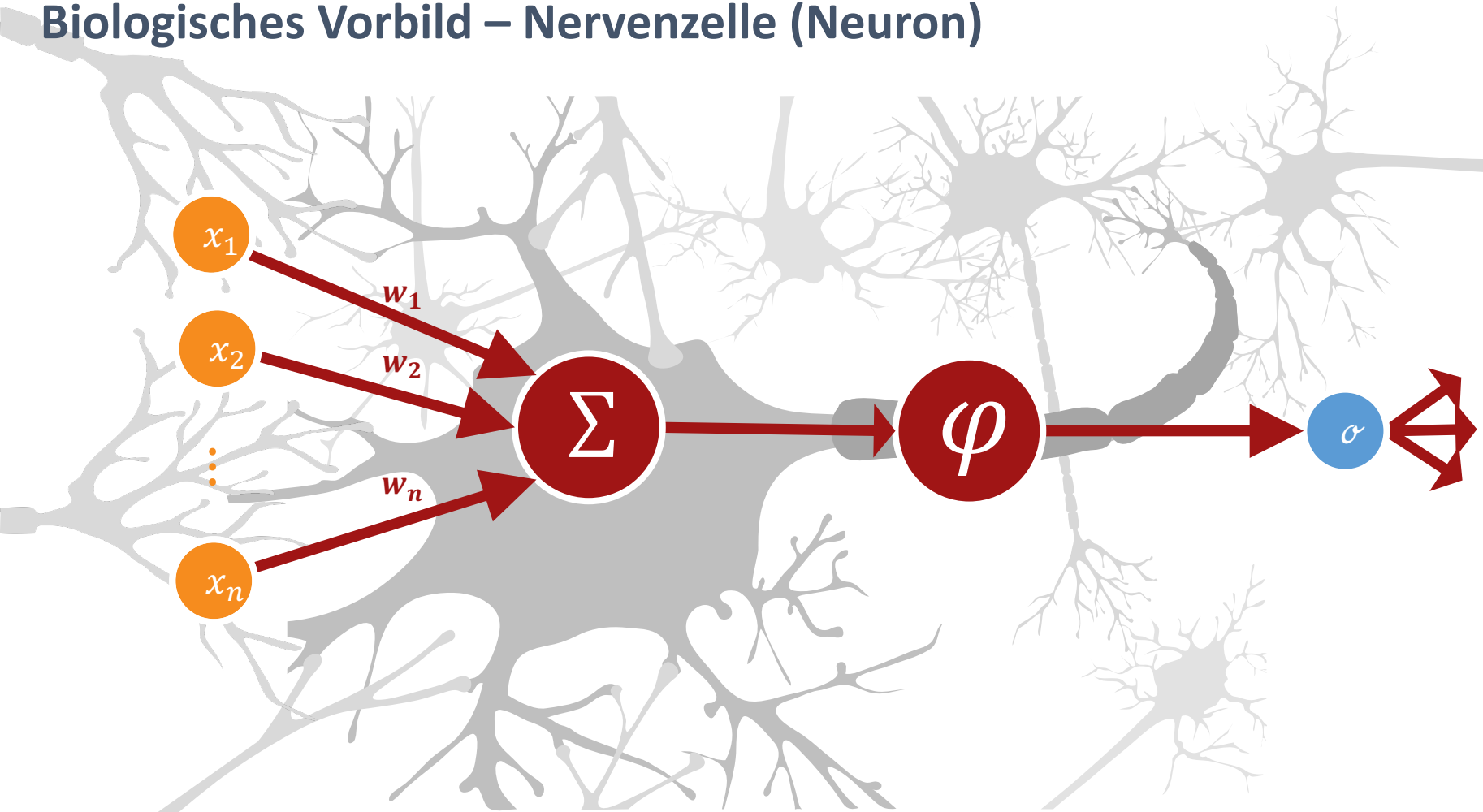
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle (Neuron)



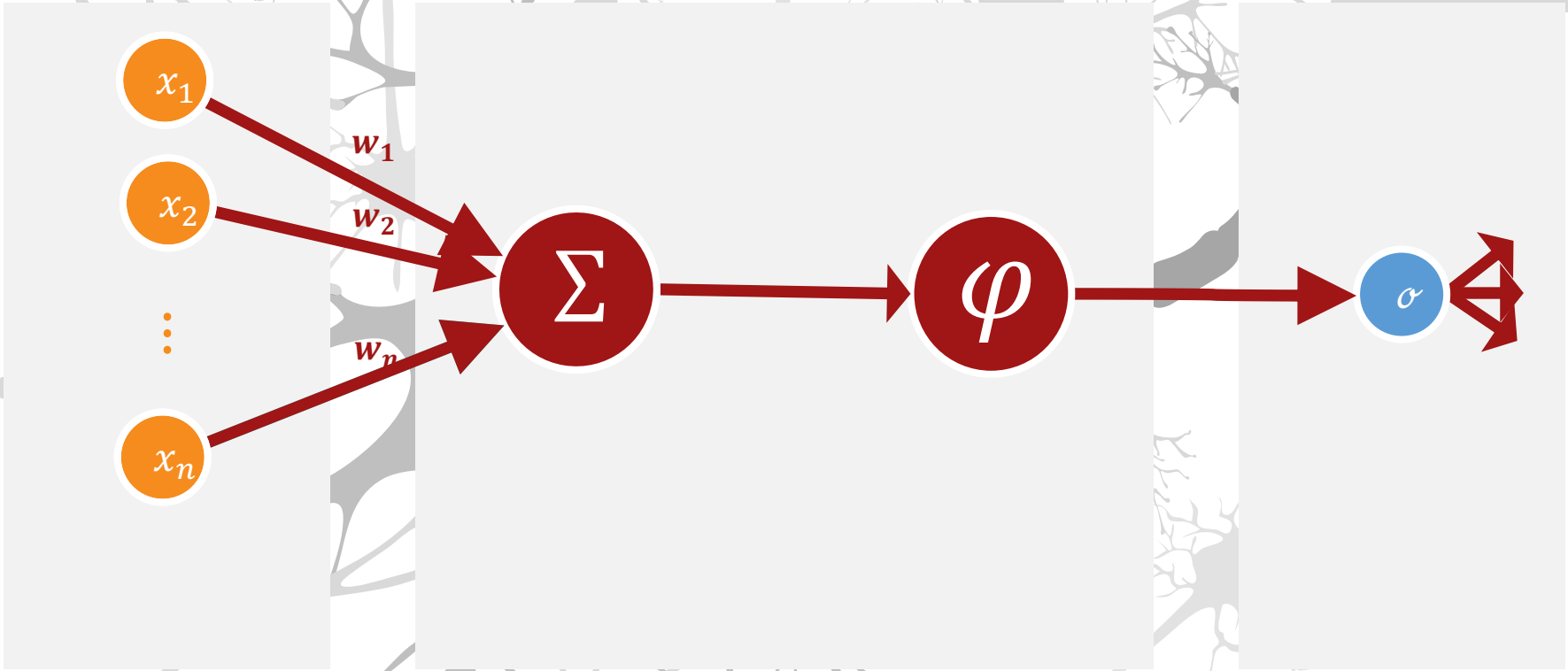
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Biologisches Vorbild – Nervenzelle (Neuron)



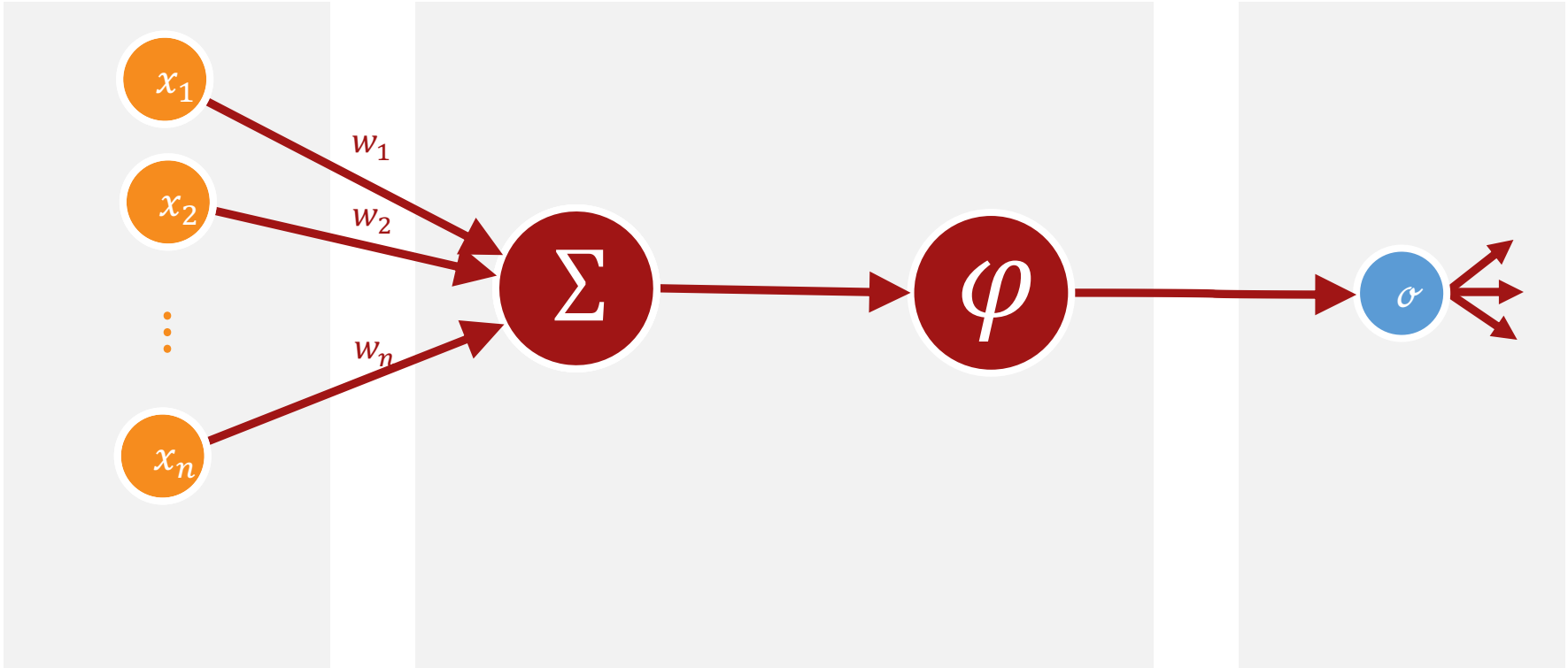
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

Künstliches Neuron und seine Funktionsweise

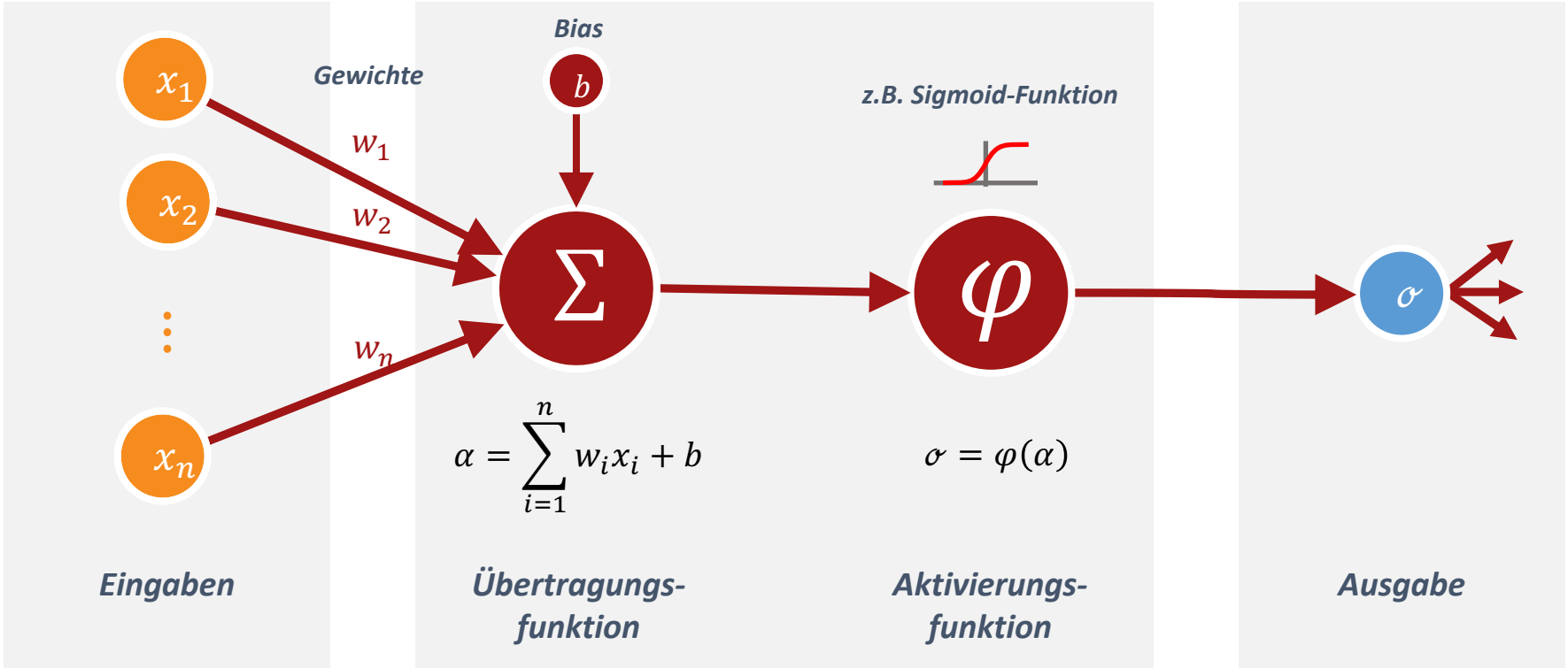


https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Complete_neuron_cell_diagram_de.svg

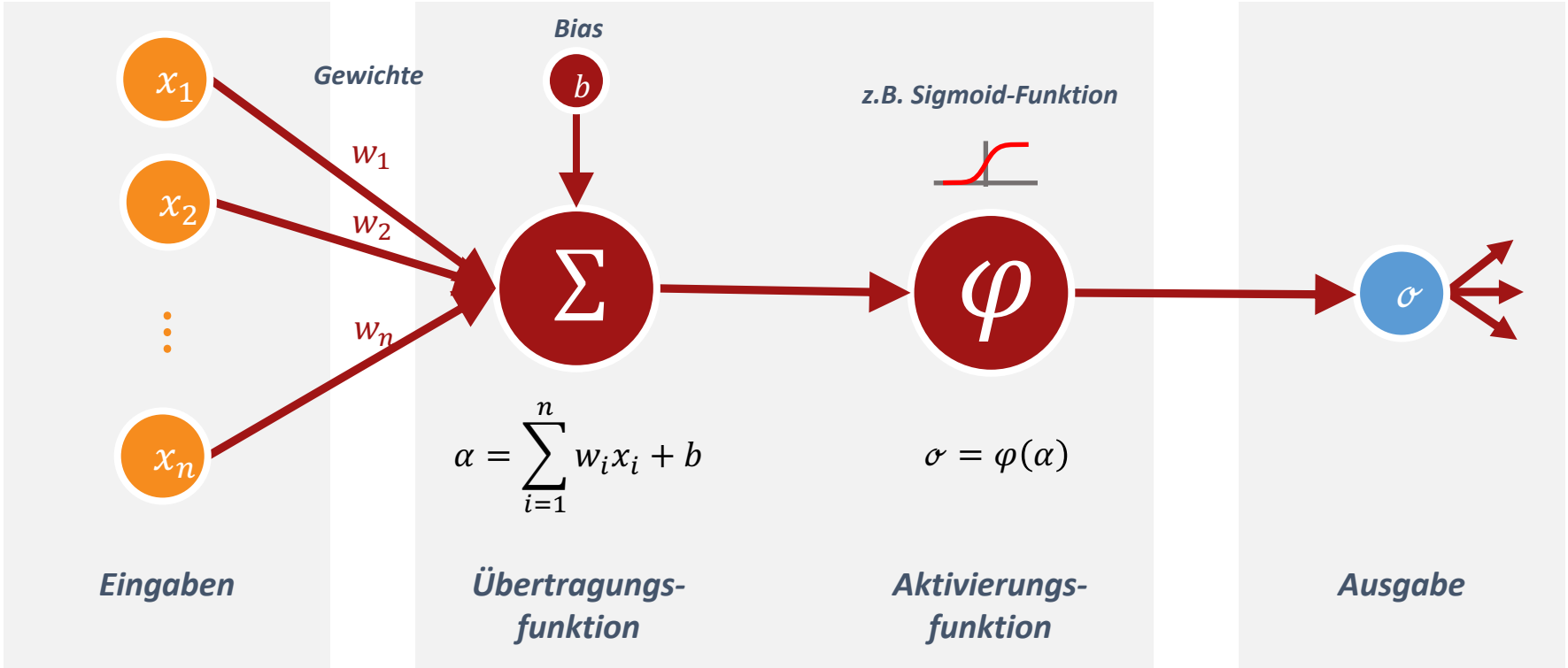
Künstliches Neuron und seine Funktionsweise



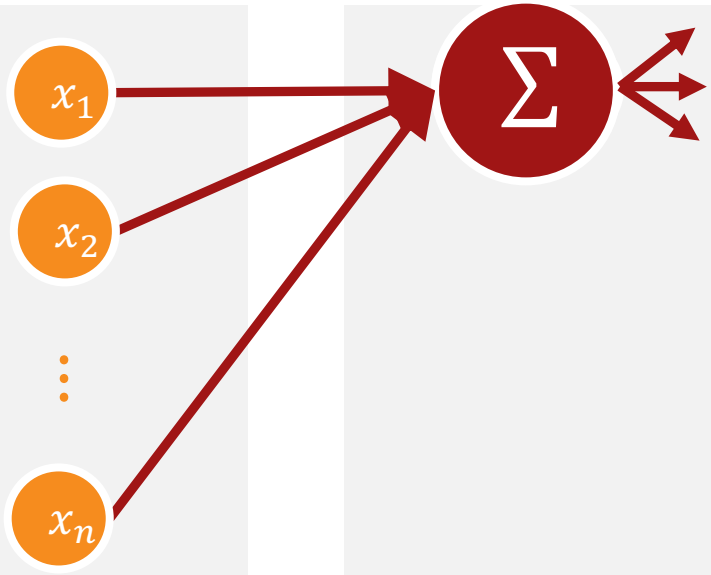
Künstliches Neuron und seine Funktionsweise



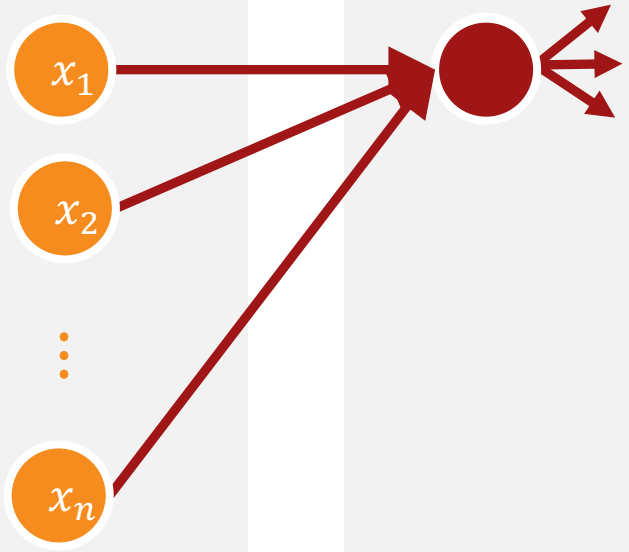
Künstliches Neuron – Teil eines Neuronalen Netzes



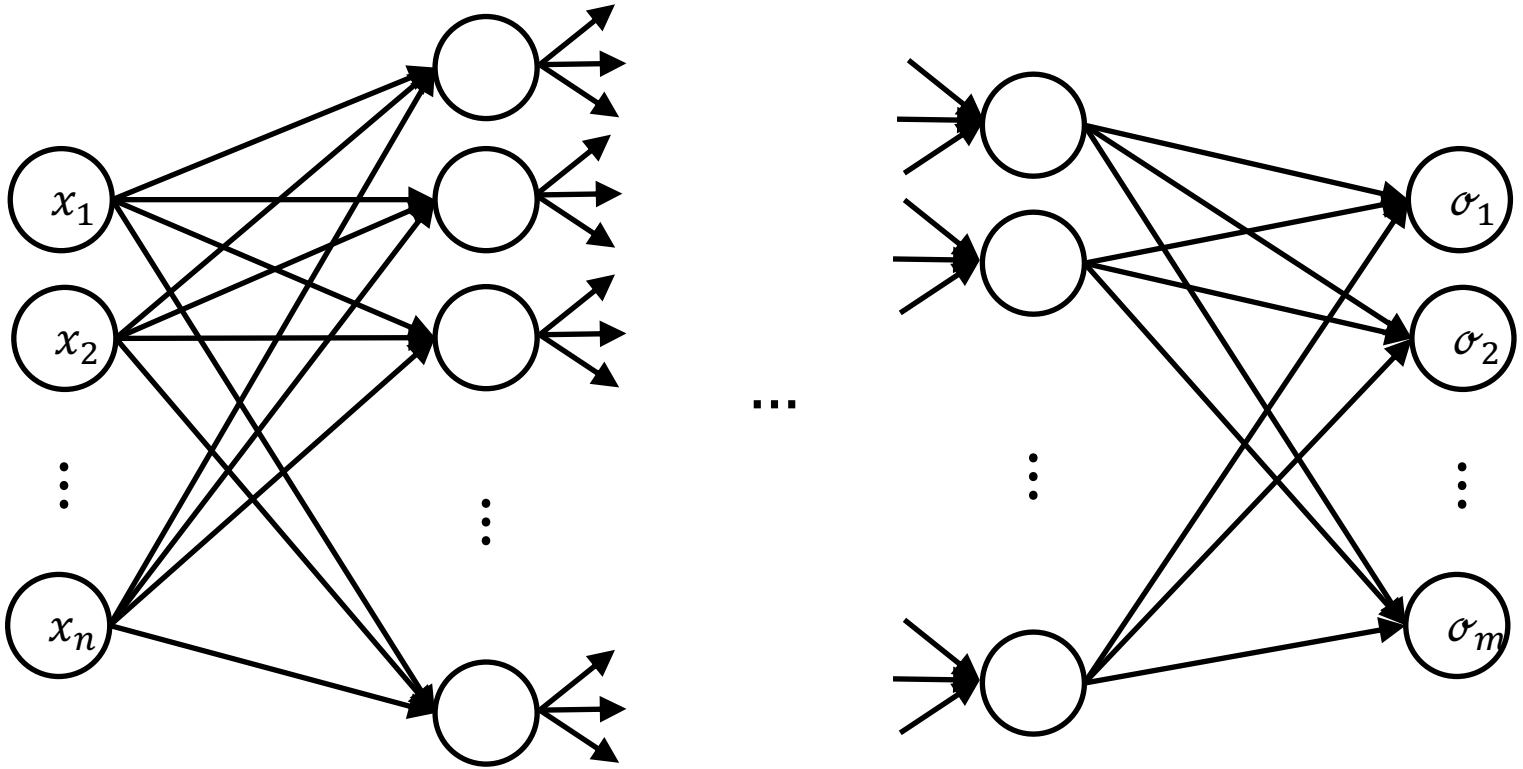
Künstliches Neuron – Teil eines Neuronalen Netzes



Künstliches Neuron – Teil eines Neuronalen Netzes

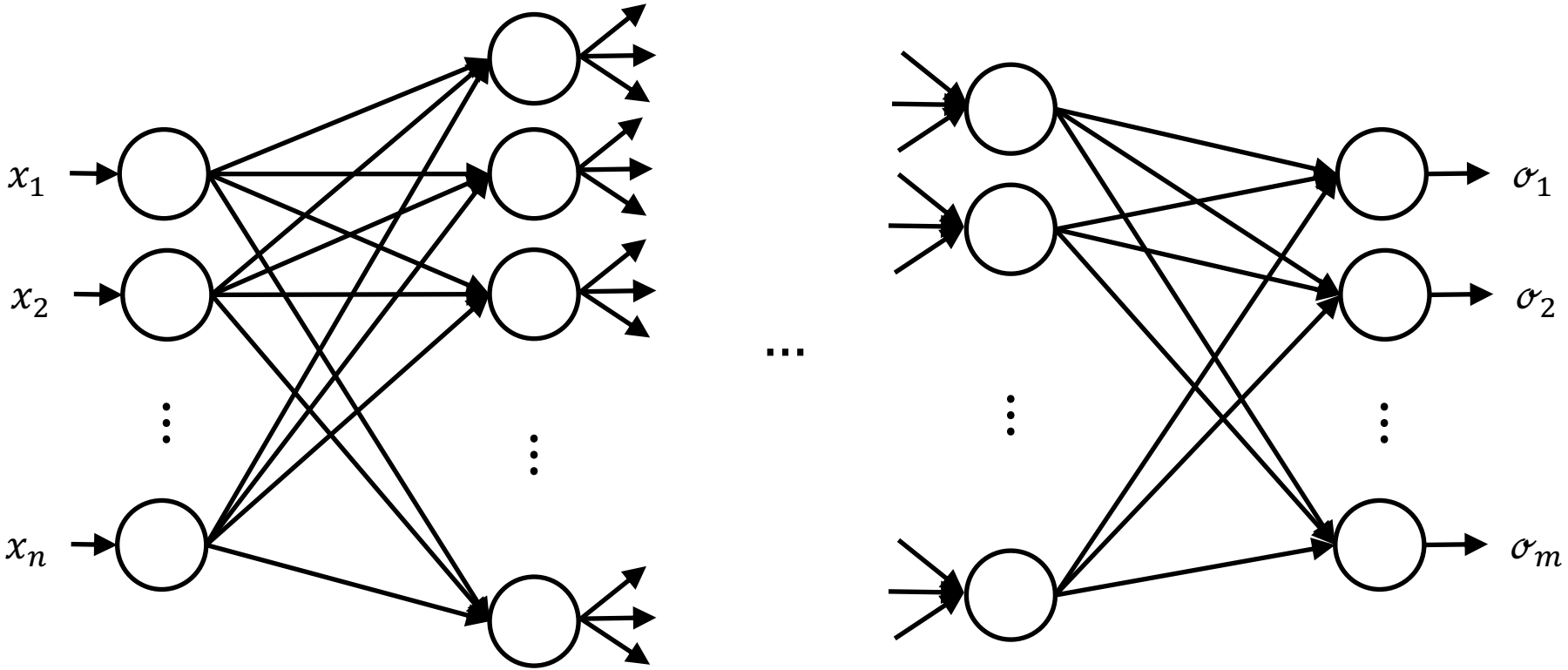


Künstliches Neuron – Teil eines Neuronalen Netzes



Eingabeschicht	*Verborgene Schicht*	*Verborgene Schicht*	*Ausgabeschicht*
U_0	U_1	U_{H-2}	U_{H-1}

Künstliches Neuron – Teil eines Neuronalen Netzes



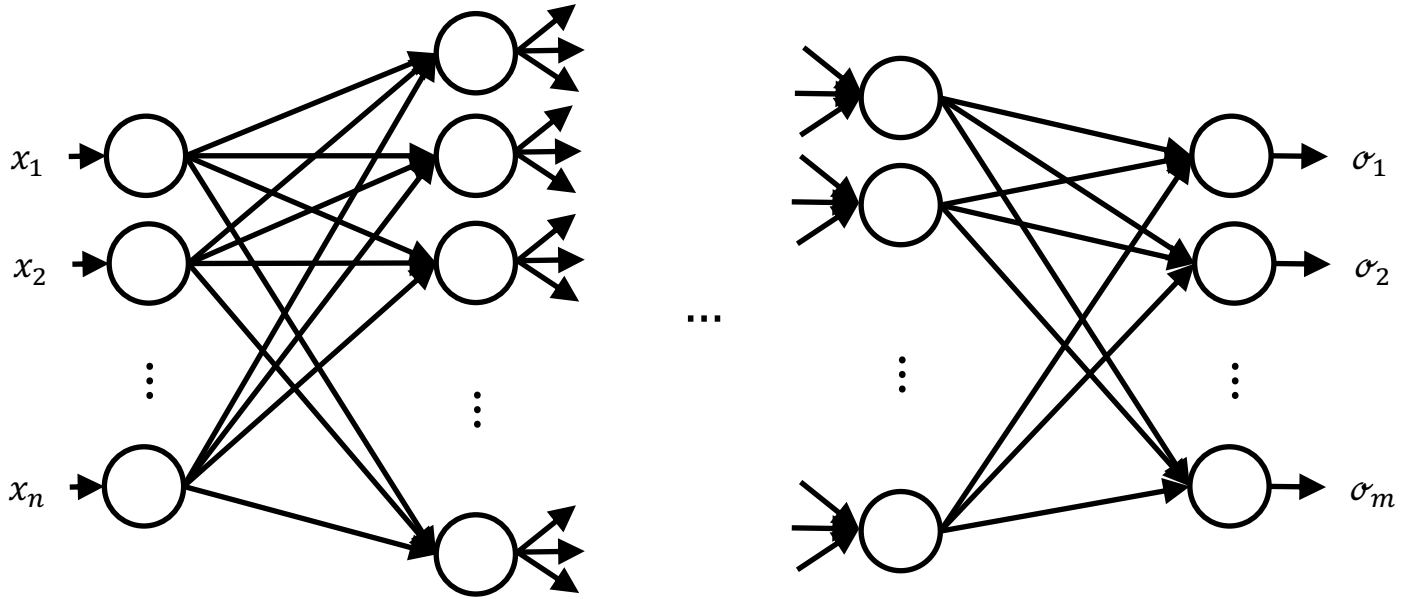
Eingabeschicht U_0

Verborgene Schicht U_1

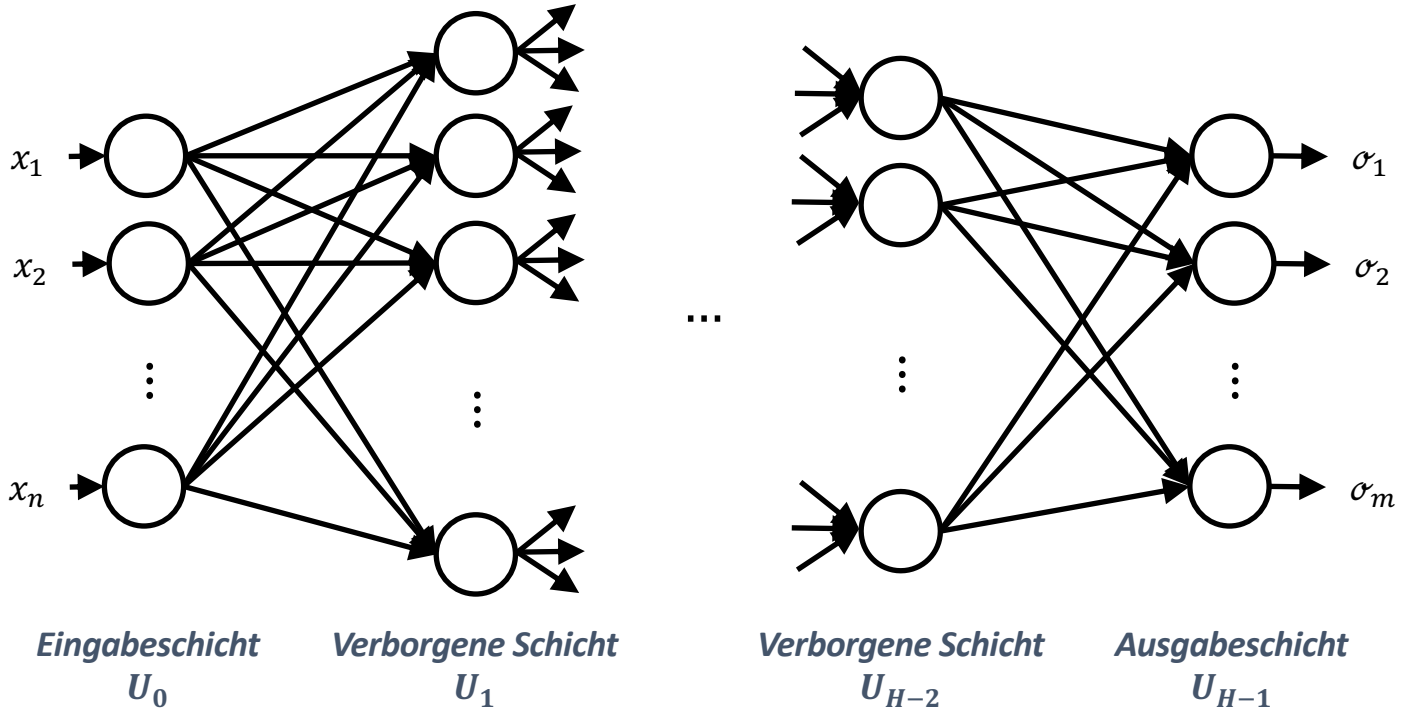
Verborgene Schicht U_{H-2}

Ausgabeschicht U_{H-1}

Künstliches Neuron – Teil eines Neuronalen Netzes

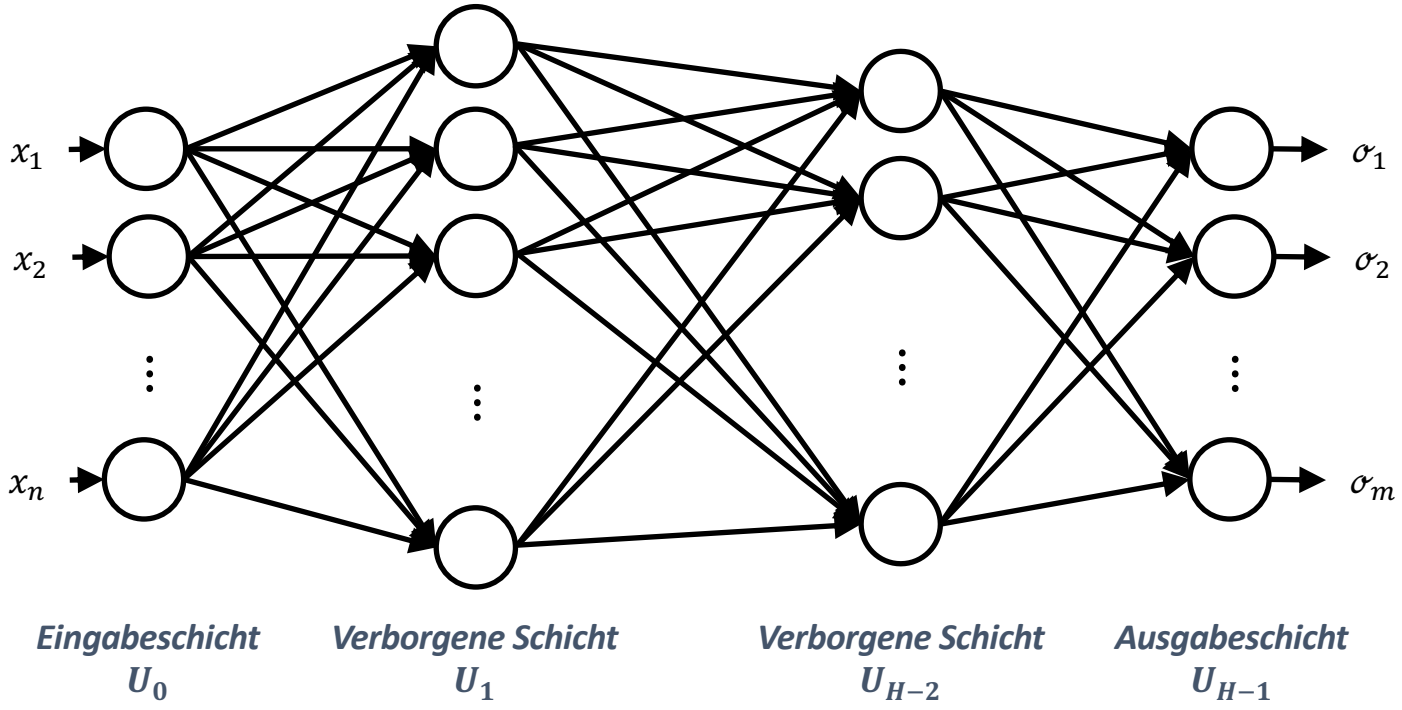


Neuronales Netz – Berechnung



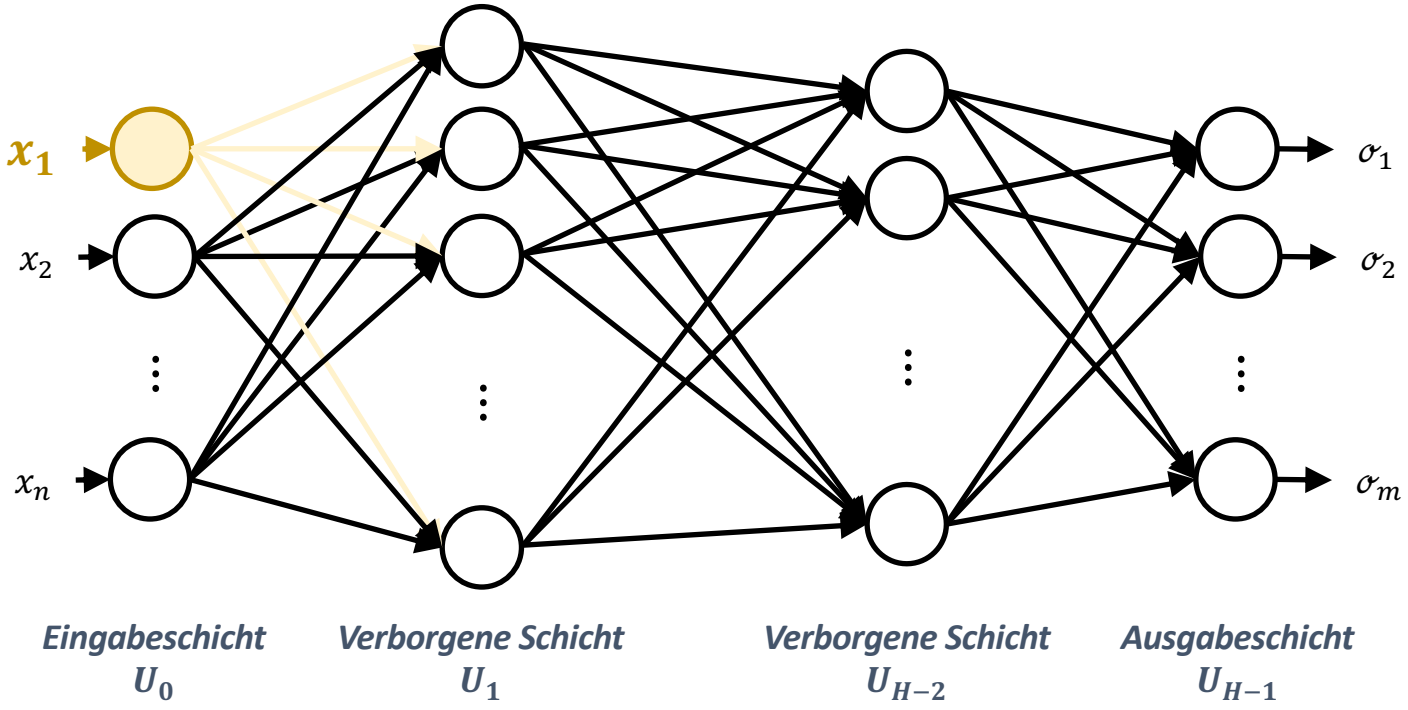
Jetzt können wir auch ein komplexeres Beispiel mit mehreren Neuronen und Schichten rechnen.

Neuronales Netz – Berechnung



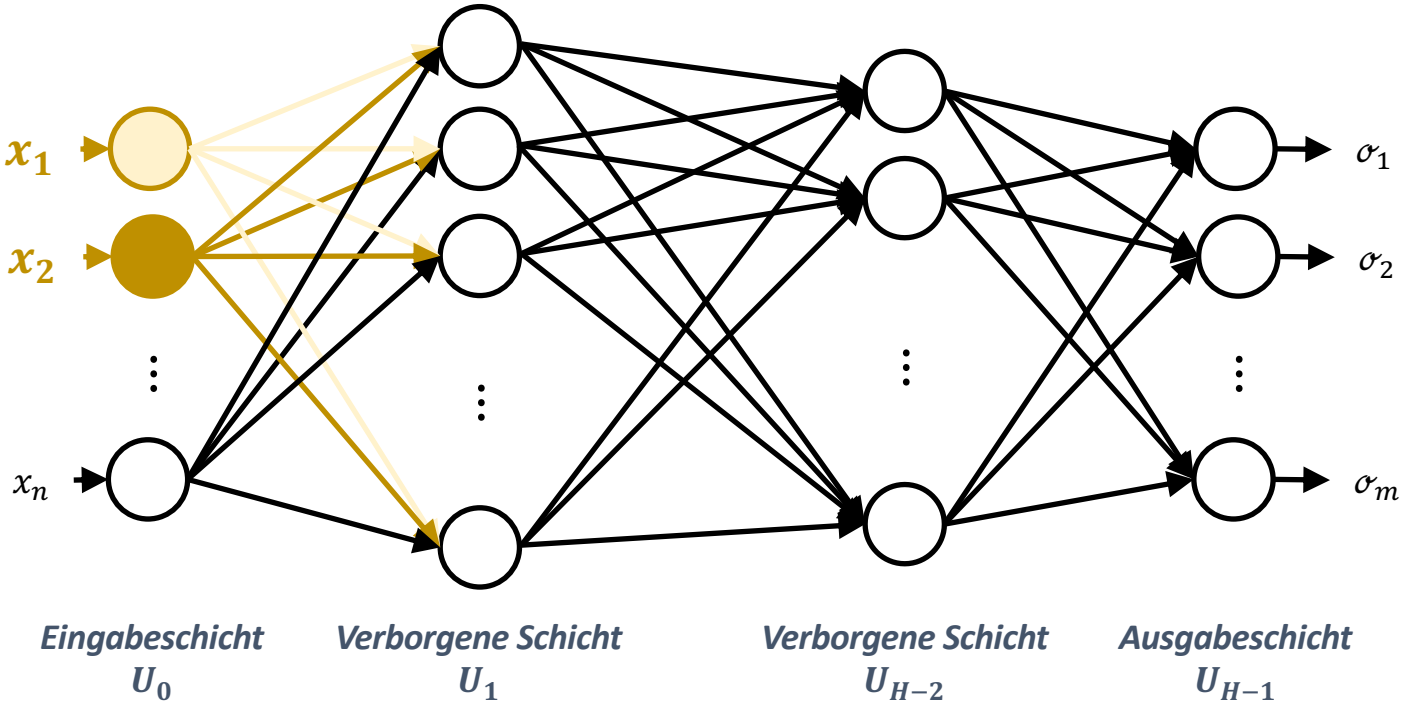
Das Netz erhält einen Eingabevektor $\vec{x} = (x_1, \ldots, x_n)$ als Eingabe.

Neuronales Netz – Berechnung



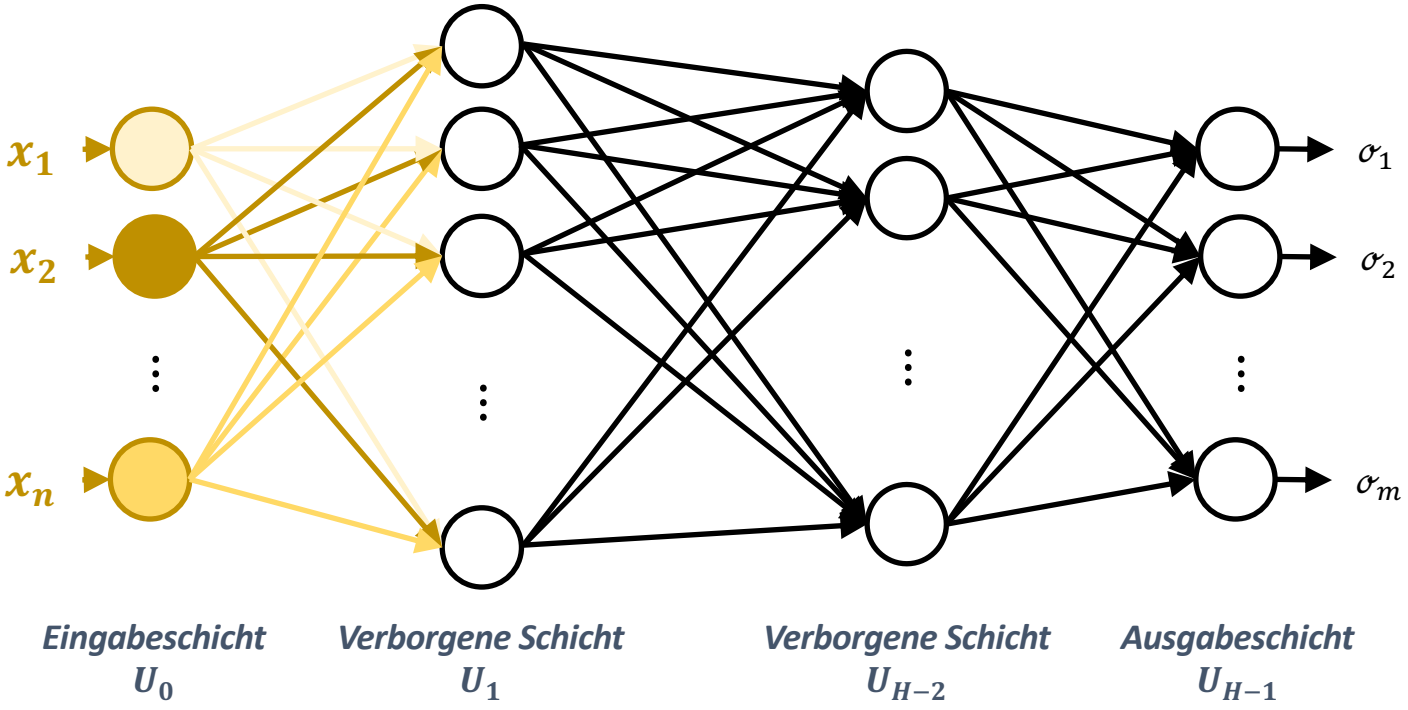
Das Netz erhält einen Eingabevektor $\vec{x} = (x_1, \ldots, x_n)$ als Eingabe.

Neuronales Netz – Berechnung



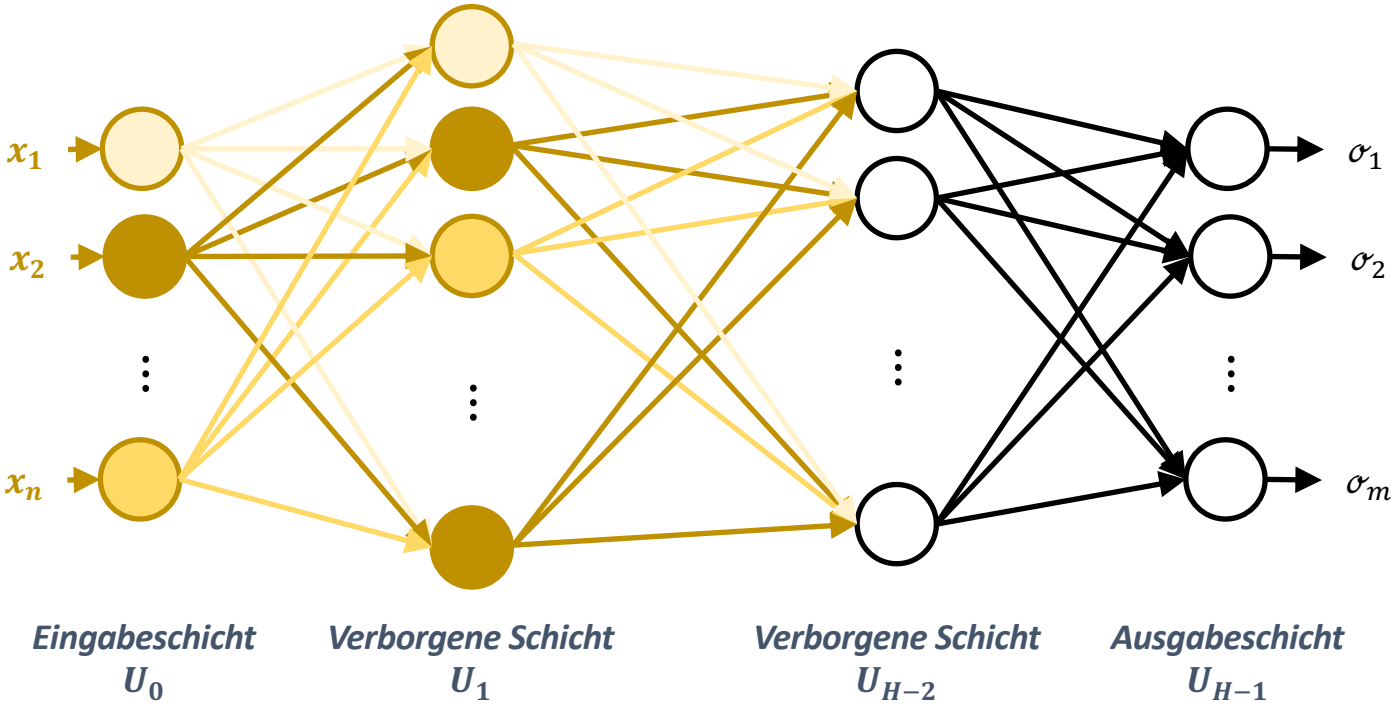
Das Netz erhält einen Eingabevektor $\vec{x} = (x_1, \ldots, x_n)$ als Eingabe.

Neuronales Netz – Berechnung



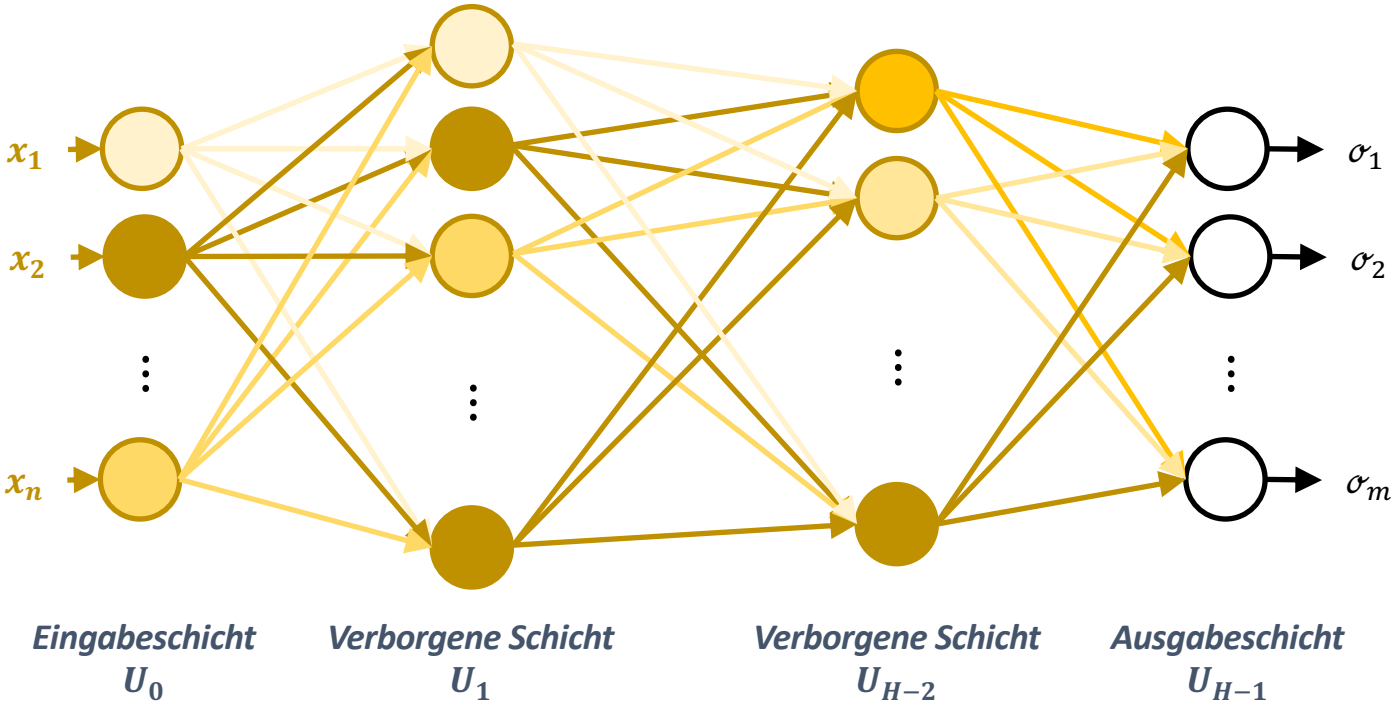
Das Netz erhält einen ***Eingabevektor*** $\vec{x} = (x_1, \ldots, x_n)$ als Eingabe.

Neuronales Netz – Berechnung



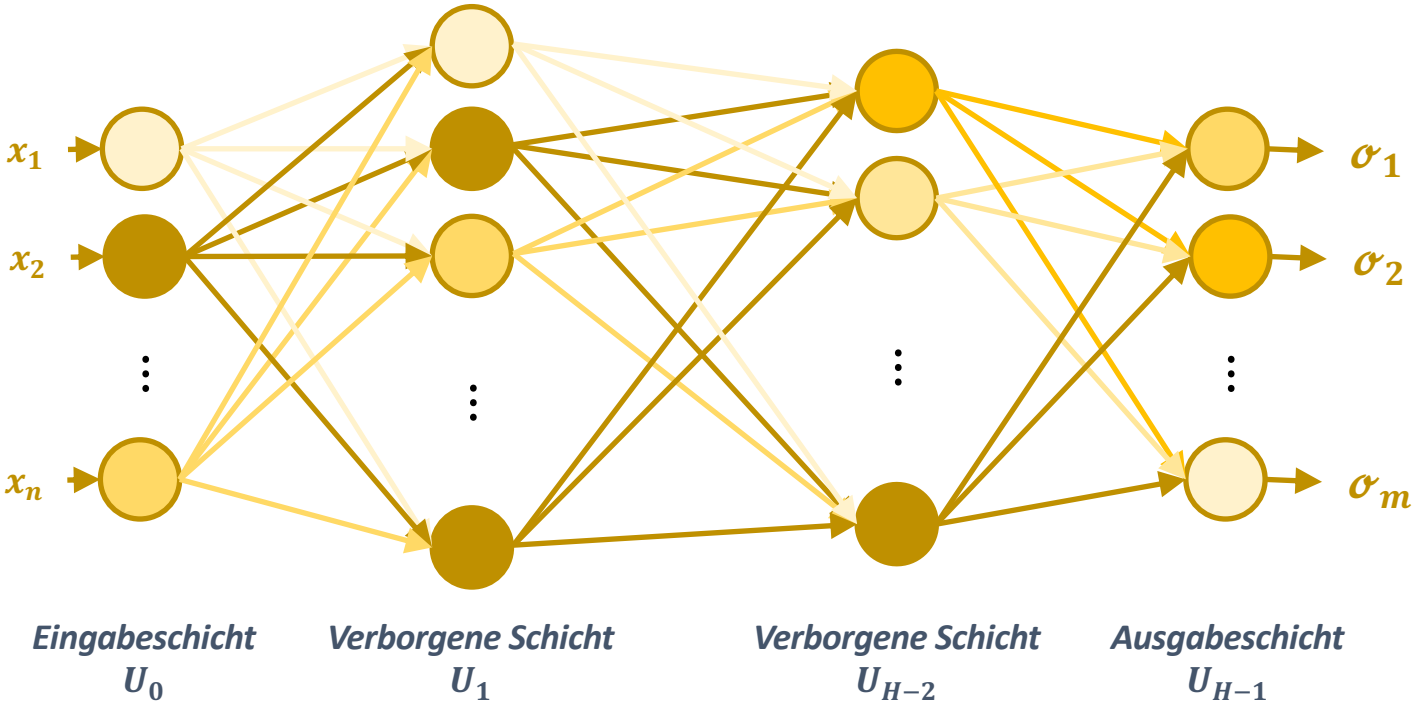
In der Schicht U_1 wird bei jedem Neuron zunächst über die ***Übertragungsfunktion*** die Aktivierung und dann über die ***Aktivierungsfunktion*** die Ausgabe ermittelt.

Neuronales Netz – Berechnung



Die Daten durchlaufen somit das Netz Schicht für Schicht (von links nach rechts).

Neuronales Netz – Berechnung



Die Ausgabeschicht U_{H-1} liefert am Ende eine Ausgabe

$$\vec{o}_{H-1} = \left(o_{H-1,1}, \dots, o_{H-1,m}\right) = \vec{o} = (o_1, \dots, o_m).$$

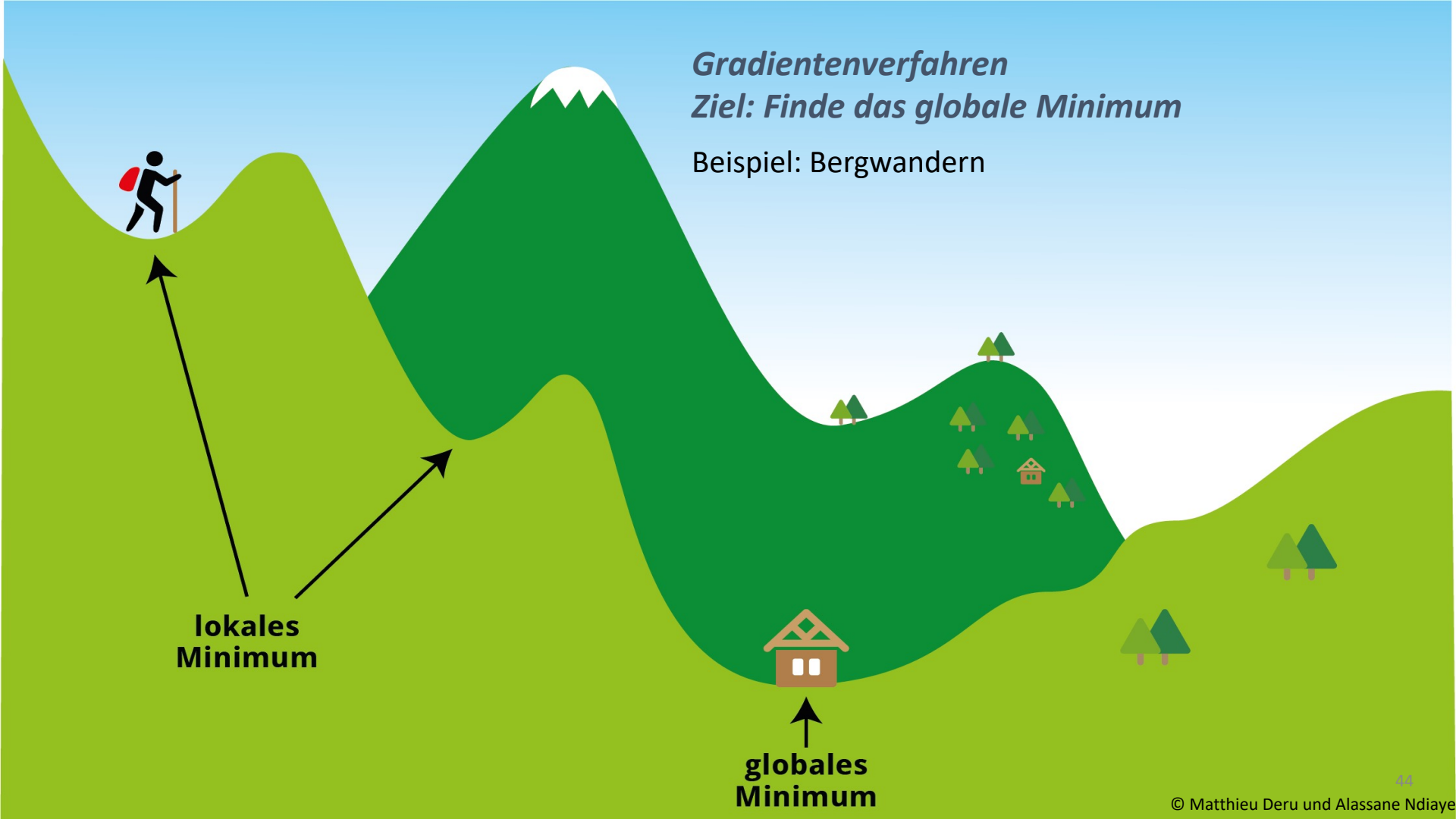
Lernen eines Neuronalen Netzes

Wir haben gesehen, dass sich ein Neuronales Netz sehr einfach berechnen lässt. Wie wir im Folgenden sehen werden, ist es jedoch sehr aufwändig, ein Neuronales Netz zu lernen. Warum ist das so?

Man kann das Lernen eines Neuronalen Netzes in etwa mit der Primfaktorzerlegung vergleichen. Die Multiplikation zweier Zahlen ist sehr einfach. Das Zerlegen einer Zahl in seine Primzahlen (insbesondere zweier sehr großer Primzahlen) ist jedoch sehr aufwändig und schwierig. Darauf beruht u.a. die Sicherheit des RSA-Kryptosystems. Wenn jemand die Primfaktorzerlegung schnell berechnen kann, dann kann er auch die mit RSA verschlüsselten Texte entschlüsseln.

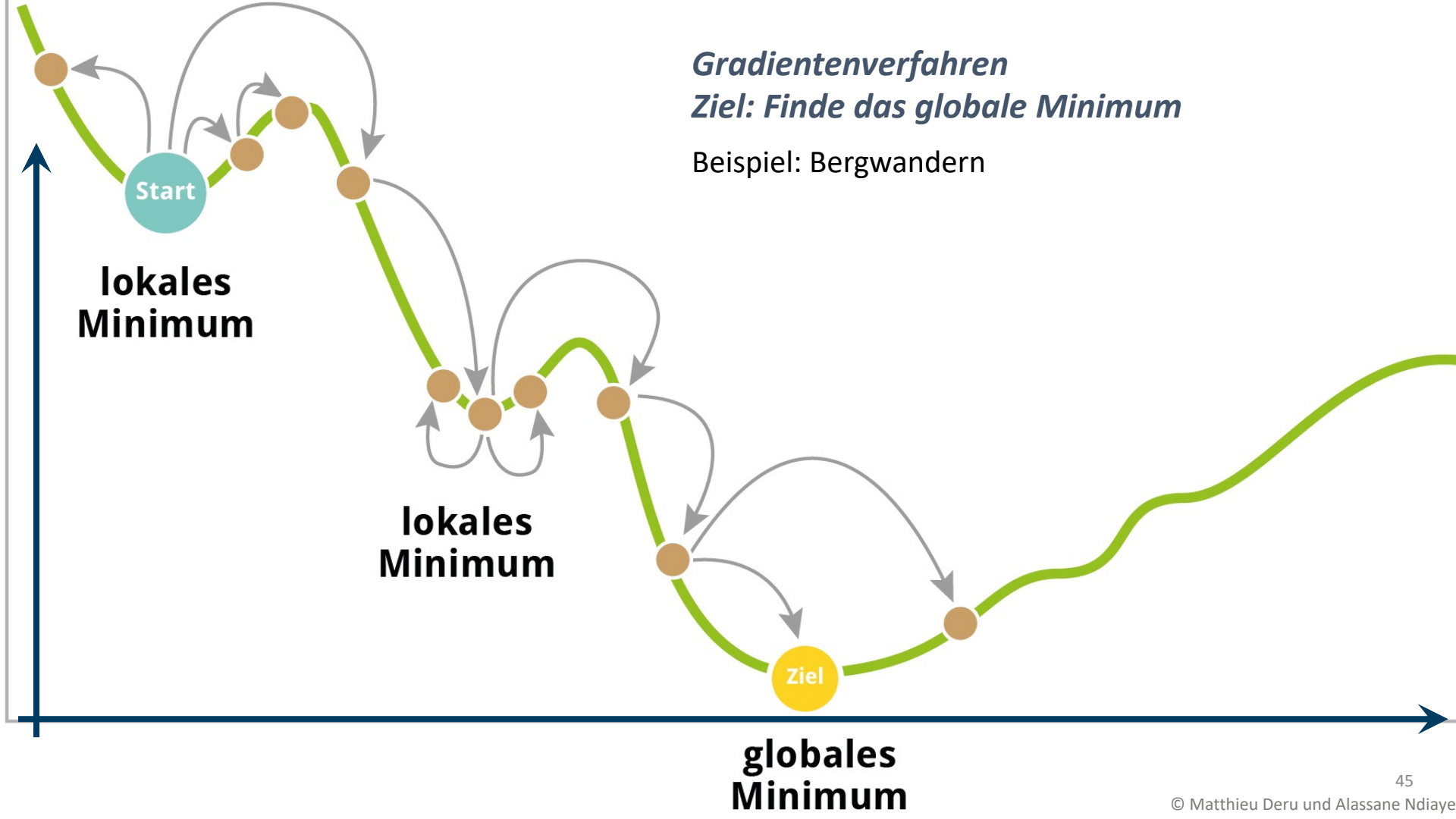
Wenn man beim Lernen eines Neuronalen Netzes bei der Analogie der Primfaktorzerlegung bleibt, dann kommt hinzu, dass man noch nicht einmal die Zahl kennt, die in ihre Primfaktoren zerlegt werden soll. (Dies ist bei der Primfaktorzerlegung allerdings nicht der Fall; da kennt man die zu zerlegende Zahl.) Schauen wir uns diese „Blindheit“ im Folgenden genauer an.

$450 = 2 * 225$
$450 = 2 * 3 * 75$
$450 = 2 * 3 * 3 * 25$
$450 = 2 * 3 * 3 * 5 * 5$

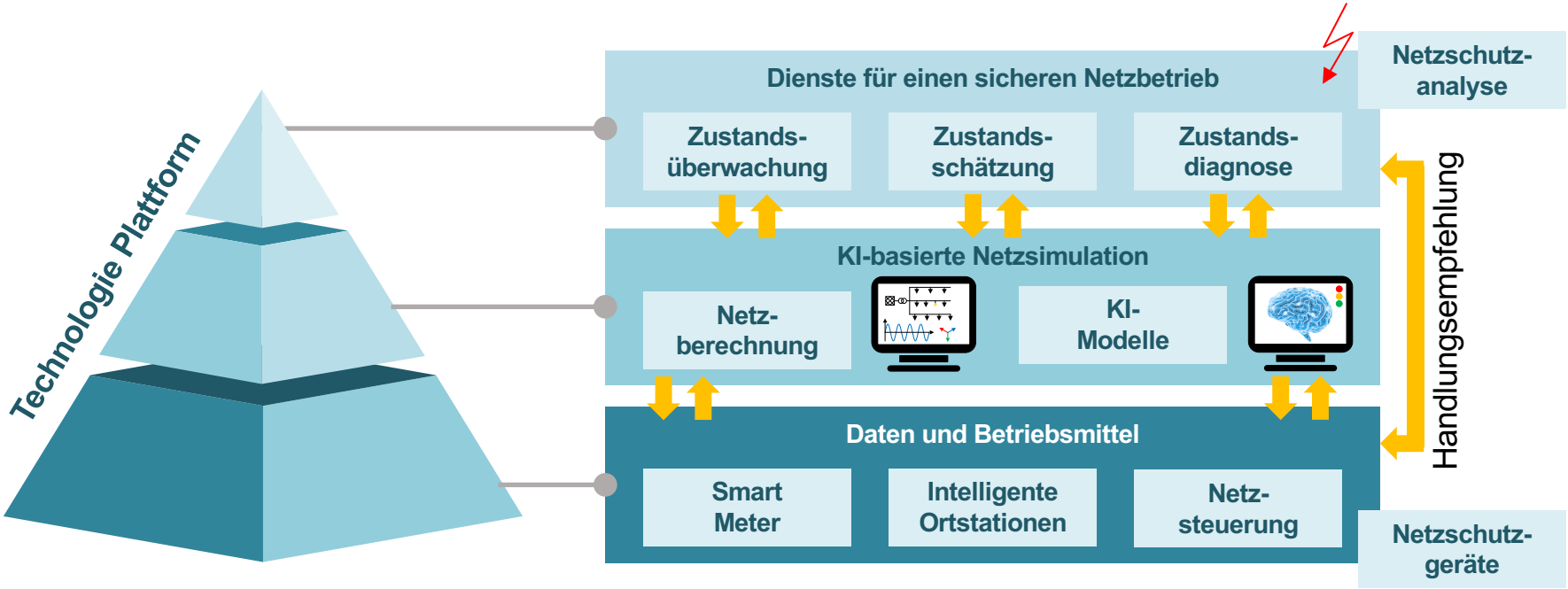


Gradientenverfahren
Ziel: Finde das globale Minimum

Beispiel: Bergwandern



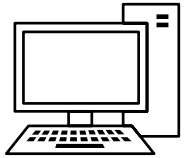
KI-basierte Netzsimulation



KI-basierte Netzsimulation

GridAnalysis

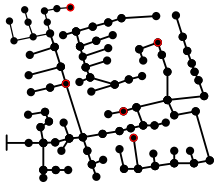
Vorbereitungsphase



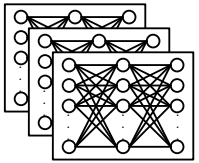
Netz-berechnung

Fallgenerator

Netzzustandsanalyse
Netzzustandsdiagnose
Training der KI-Systeme



Netztopologie-daten



Stadtwerke Saarlouis – Mit Energie. Mit Sicherheit. Mit uns.
VSE Verteilnetz GmbH

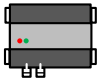
Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH

Stadtwerke Saarlouis – Mit Energie. Mit Sicherheit. Mit uns.
VSE Verteilnetz GmbH

Städtisches und ländliches Feldtestgebiet

Messungen

Schätzung



Schätzung

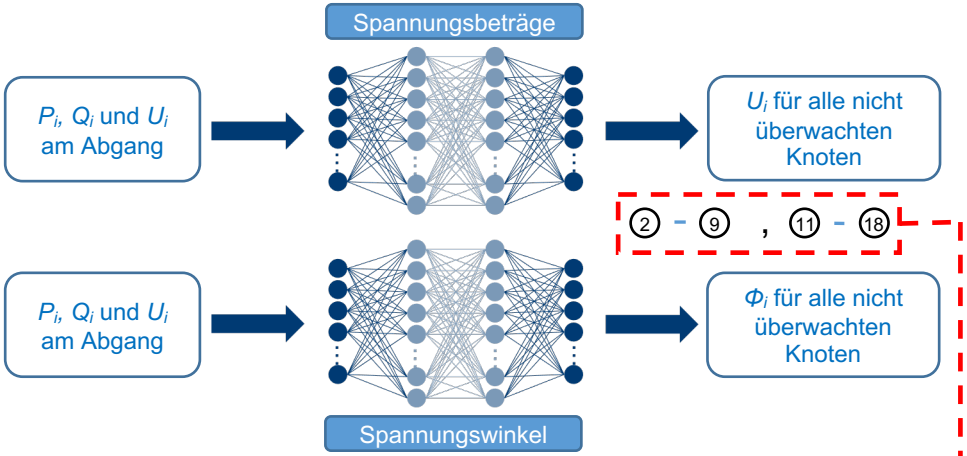
Lastfluss

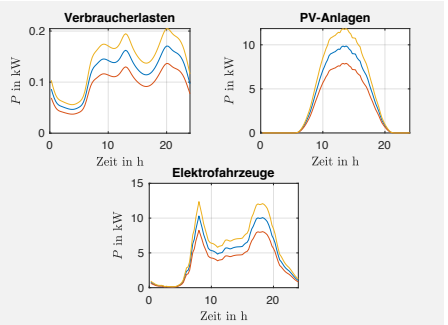
$$\tilde{\mathbf{s}} = \left[\tilde{\mathbf{p}}_1 \cdots \tilde{\mathbf{p}}_N \;\; \tilde{\mathbf{q}}_1 \cdots \tilde{\mathbf{q}}_N\right]$$

$$\tilde{\mathbf{x}} = \left[\tilde{\boldsymbol{\delta}}_2 \cdots \tilde{\boldsymbol{\delta}}_n \;\; \tilde{\mathbf{u}}_1 \cdots \tilde{\mathbf{u}}_n\right]^T$$

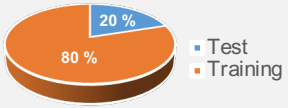
Vorbereitungsphase – KNN Modell

GridAnalysis





233.937 Szenarien



Fallgenerator

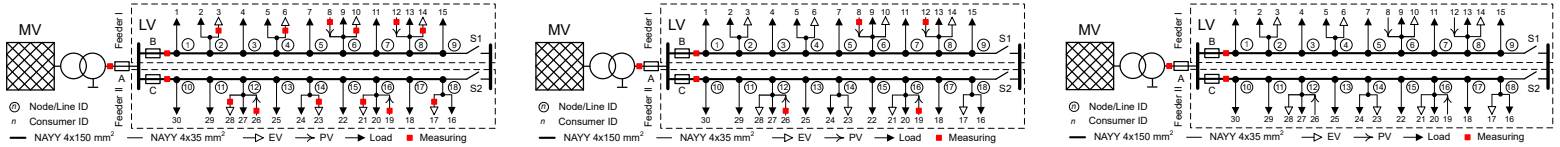
```
#############################################
#          Neuronale Netz anlegen
#############################################
class MeinNetz(nn.Module):
    def __init__(self):
        nhidden = 20
        super(MeinNetz, self).__init__()
        self.lin1 = nn.Linear(3, nhidden)
        self.lin2 = nn.Linear(nhidden, nhidden)
        self.lin3 = nn.Linear(nhidden, nhidden)
        self.lin4 = nn.Linear(nhidden, nhidden)
        self.lin5 = nn.Linear(nhidden, 18)

    def forward(self,x):
        x = F.relu(self.lin1(x))
        x = F.relu(self.lin2(x))
        x = F.relu(self.lin3(x))
        x = F.relu(self.lin4(x))
        x = self.lin5(x)
        return x
```

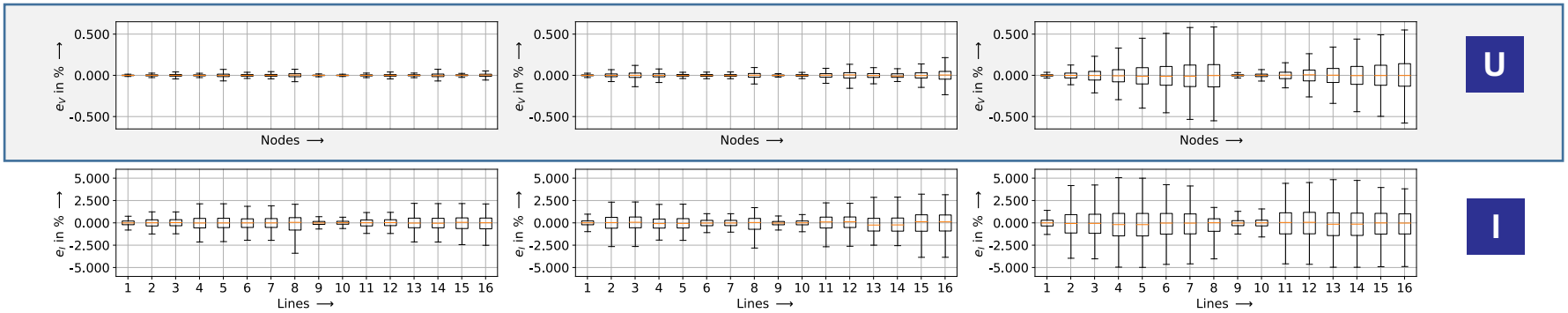
GPU-Server

Training der KNN

Validierung der KNN – Relative Fehler



MC1 **MC2** **MC3**



$$e_U = \frac{U_{L1E,KI} - U_{L1E,wahr}}{\frac{U_n}{\sqrt{3}}}$$

$-1\,\% \leq e_U \leq 1\,\%$ ✓

$$e_I = \frac{I_{L1,KI} - I_{L1,wahr}}{I_r}$$

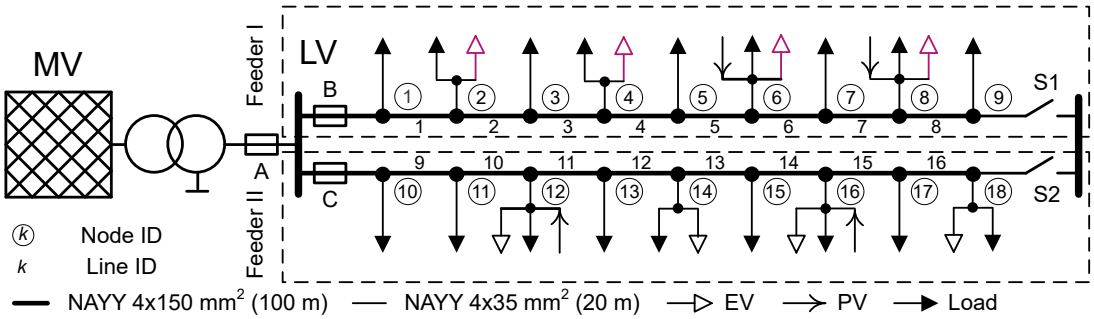
$-10\,\% \leq e_I \leq 10\,\%$ ✓

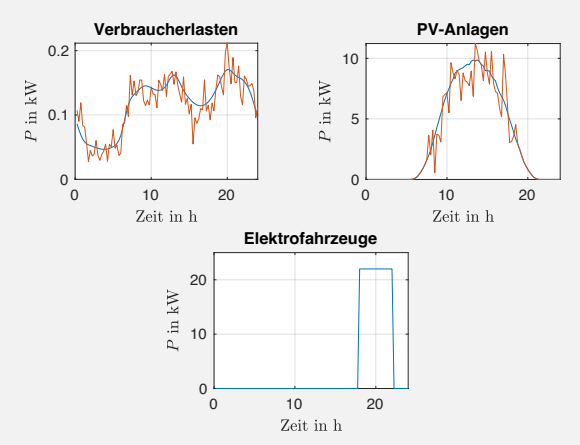
Quelle: A. Winter 2021: 2

MC: Measuring Configuration

Anwendungsfall

96 mal 15-Minuten Intervalle E-Mobile deaktiviert





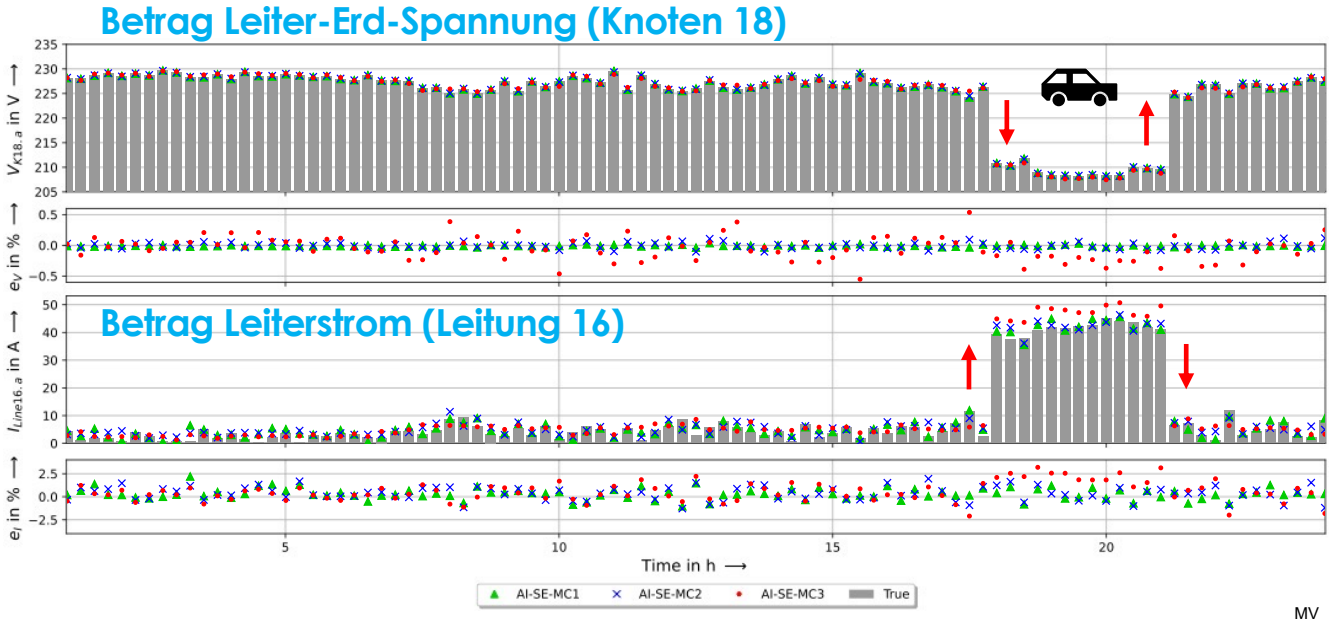
E-Mobile unterer Abgang:

- Ladevorgang von **18:00 Uhr** bis **21 Uhr**
- **P = 22 kW** mit cos(φ) = 1

Szenario 1 (Sz1)	Szenario 2 (Sz2)
S1 offen	S1 geschlossen
S2 offen	S2 geschlossen

Berücksichtigung unterschiedlicher Schaltzustände

Anwendungsfall im Stromnetz - Ergebnisse



$|e_U| < 0,56\ \%$

$-1\ \% \leq e_U \leq 1\ \%$

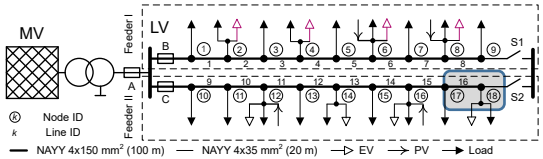
$|e_I| < 3,2\ \%$

$-10\ \% \leq e_I \leq 10\ \%$

AI-SE-MC1
- Überwachung der E-Mobile, PV-Anlagen und Ortsnetzstation

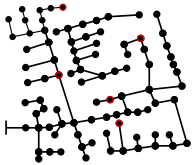
AI-SE-MC2
- Überwachung der PV-Anlagen und Ortsnetzstation

AI-SE-MC3
- Überwachung der Ortsnetzstation



Quelle: A. Winter 2021: 2

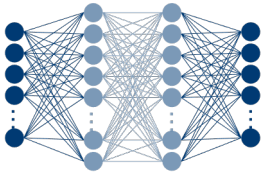
KI-Systeme für Kurzschlussstromberechnungen



Stammdaten der Betriebsmittel

Physikalisches Modell des Stromnetzes

Stationäre KS-Berechnung



KI-basierte KS-Berechnung

- Verlagerung der rechenintensiven Trainingsphase in den Offline-Betrieb
- Berechnung einer großen Anzahl an KS-Szenarien mit geringen Rechenzeiten
- Anwendung für Typ- und Applikationsprüfungen für Netzschutzgeräte
- Anwendung für die Überprüfung von Netzschutzkonzepten

Zusammenfassung und Ausblick

- Offline: **Daten- und rechenintensive Trainingsphase → zeitunkritisch**
- **Onlinebetrieb:** Die KI-basierten Systeme liefern Ergebnisse **sehr schnell und robust gegenüber fehlenden Messdaten**
- **Onlinebetrieb: KI-Systeme schätzen den Netzzustand auch bei geringer Anzahl an Messsystemen**
- KI-basierte Berechnung der Lastflüsse: **geringer Rechenzeit unabhängig von der Anzahl der Netzknoten**

Ausblick

- Umsetzung der KI-basierten Netzsimulation in realen Stromnetzen
- Vergleich der Ergebnisse der KI-basierten Netzsimulation mit klassischen Verfahren
- Einsatz von KI-Systemen in der Netzschutztechnik
  - Prüfverfahren mit KI-basierter Stromnetzberechnung für Typprüfung und Anwendungsprüfung
  - Signifikante Reduktion der Prüfzeiten bzw. Erhöhung der Anzahl Prüfszenarien
  - Steigerung der Prüftiefe und Prüfqualität (Wegfall von Großkraftwerken und weiterem Zubau von DEAs)

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich

GridAnalysis

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH

htw saar

Stadtwerke Saarlouis

Mit Energie. Mit Sicherheit. Mit uns.

VSE Verteilnetz GmbH

Referenzen

[1] Winter, A.; Igel, M.; Schegner, P. (2021): Supervised Learning Approach for State Estimation in Distribution Systems with missing Input Data. Hg. v. 2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe). Espoo, Finnland.

[2] Winter, A.; Igel, M.; Schegner, P. (2020): Application of artificial intelligence in power grid state analysis and -diagnosis. In: Detlef Schulz (Hg.): NEIS 2020. Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems Hamburg, 14 - 15 September 2020. 1. Neuerscheinung. Berlin: VDE Verlag, S. 128–133.

[3] Deru, M.; Ndiaye, A.: Deep Learning mit TensorFlow, Keras und TensorFlow.js. Rheinwerk Computing, 2. Auflage, 2020.

[4] Brandherm, B.; Deru, M.; Ndiaye, A.; Kiefer, G.-L.; Baus, J.; Gampfer, R.: Integration erneuerbarer Energien – KI-basierte Vorhersageverfahren zur Stromerzeugung durch Photovoltaikanlagen. Angewandte Wirtschaftsinformatik. Springer Vieweg, 2021.

[5] GridAnalysis – KI-basierte Systemanalyse von Stromverteilnetzen im Normal- und Kurzschlussbetrieb. www.gridanalysis.de

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Ansprechpartner
Andreas Winter, M. Sc.
Institut für Elektrische Energiesysteme
Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes
andreas.winter@htwsaar.de
Tel.: +49 681 5867-356