

# Maschinelles Lernen: Neuronale Netze

Ideen der Informatik

Kurt Mehlhorn



16. Januar 2014



max planck institut  
informatik

The logo for the Max Planck Institute for Informatics, consisting of the stylized letters 'mpi' in a bold, lowercase font, followed by a vertical bar and the text 'max planck institut informatik'.

- Stand der Kunst im Bilderverstehen: Klassifizieren und Suchen
- Was ist ein Bild in Rohform?
- Biologische Inspiration: das menschliche Sehsystem
- Künstliche Neuronale Netze
  - Künstliche Neuronen,
  - Neuronale Netze
  - Realisierung von Und, Oder und Negation
- Trainieren von Neuronalen Netzwerken
  - Prinzip
  - Buchstaben: Stand der Kunst in 1986
- Bilderkennung heute (Deep Convolutional Networks)
- Deep Neural Networks erleben einen Boom (240 Mio Google Hits), auch Spracherkennung, Spiele lernen, usw.



# Stand der Kunst: Klassifikation (Krizhevsky et al, 2012).



container ship

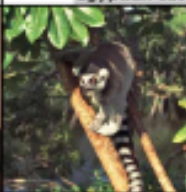
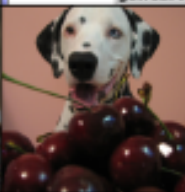
motor scooter

leopard

container ship
lifeboat
amphibian
fireboat
drilling platform

motor scooter
go-kart
moped
bumper car
golfcart

leopard
jaguar
cheetah
snow leopard
Egyptian cat



mushroom

cherry

Madagascar cat

agaric
mushroom
jelly fungus
gill fungus
dead-man's-fingers

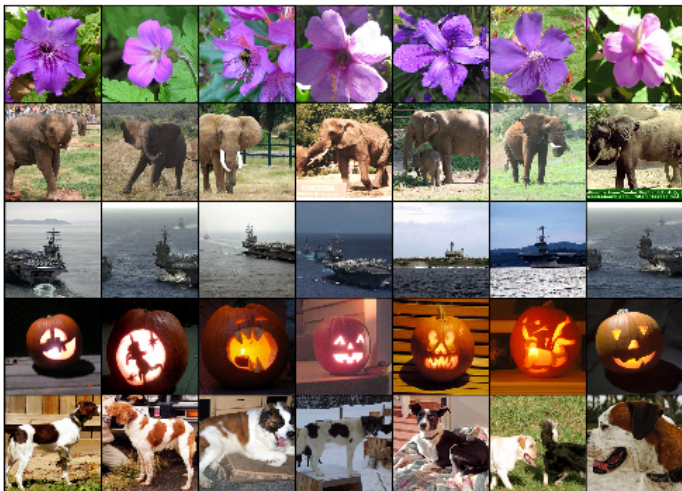
dalmatian
grape
elderberry
fordshire bullterrier
currant

squirrel monkey
spider monkey
titi
indri
howler monkey

**Training:** 1.2 Mio  
Bilder, eingeteilt in  
1000 Klassen.

**Klassifikation:**  
neue Bilder.  
System soll sagen,  
zu welcher Klasse  
das Bild gehört.

# Stand der Kunst: Suche (Krizhevsky et al, 2012), 1.2 Mio Bilder, 1000 Klassen



Frage = erste Spalte (neues Bild),

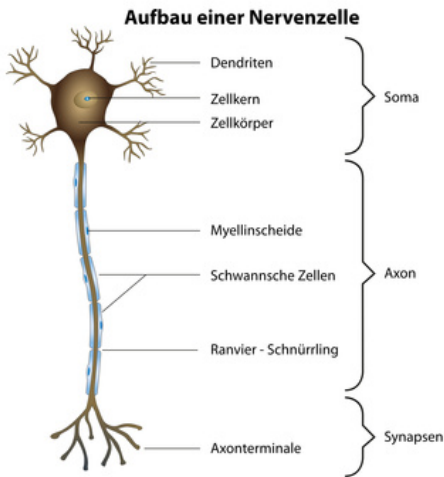
Antworten = andere Spalten  
(aus Trainingsmenge)



# Was ist ein Bild?

- Eine Matrix von Pixeln, z.B.  
1920 x 1080 Pixel bei HD-TV.
- Für jedes Pixel die Sättigung in den drei Grundfarben:  
rot, grün, blau  $\in \{0, \dots, 2^{16} - 1\}$ .
- Pixel sind so klein, dass das menschliche Auge sie nicht auflösen kann.





Axonterminale = Input

Dendriten = Output

Zelle feuert, wenn  
Gesamterregung  
einen Schwellwert  
übersteigt

Inputs können auch  
hemmend sein.

Visueller Kortex ist schichtenweise aufgebaut; 6 Schichten.

Neuronen der ersten Schicht bekommen Input von einem kleinen Feld von Sehzellen, Neuronen höherer Schichten von einem kleinen Feld der davorliegenden Schicht.

One-Learning Algorithm Hypothese, Mausexperiment



- Neuron hat  $k$  eingehende Kanten.
- Eingabewerte  $x_1$  bis  $x_k$  liegen zwischen 0 und 1.
- $k + 1$  Gewichte (Parameter)  $w_0, w_1, \dots, w_k$ .
- $w_0$  heißt Grundgewicht (Bias);  $w_i$  ist die Wichtung von  $x_i$ .
- Ausgabe =  $g(w_0 + w_1 x_1 + \dots + w_k x_k)$ .
- $g$  = Sigmoid Funktion.
- Sigmoid Funktion ist differenzierbare Approximation einer Stufe von 0 nach 1 an der Stelle 0.



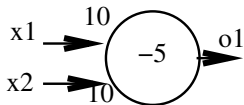
$$g(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

- $g(0) = 1/2$ .
- $g(1) = 0.73$
- $g(4) = 0.95, g(10) = 0.99995$
- symmetrisch zu  $(0, 1/2)$ .
- differenzierbare Approximation einer Stufe von 0 nach 1 an der Stelle 0.
- wenn man  $e^{-z}$  durch  $e^{-10z}$  ersetzt, wird Flanke steiler.

$$g(z) + g(-z) =$$

$$g'(z) =$$

# Realisierung von Oder und ...



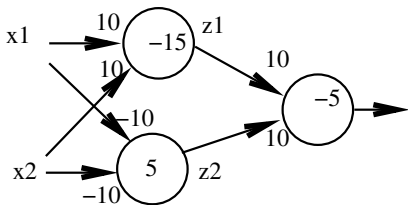
$$o_1 = g(-5 + 10x_1 + 10x_2) \approx x_1 \vee x_2$$

$$o_2 = g(15 + 10x_1 - 10x_2) \approx$$

$x_1$	$x_2$	$o_1 =$	$o_1 \approx$	$o_2 =$	$o_2 \approx$
0	0	$g(-5)$	0		
0	1				
1	0				
1	1				

# Komplexeres Beispiel

Welche Boolesche Funktion wird durch dieses Neuronale Netz berechnet?

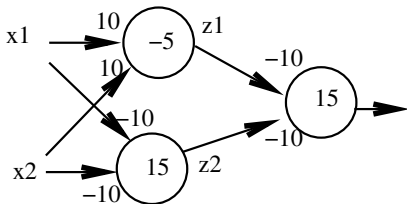


$x_1$	$x_2$	$z_1 =$	$z_1 \approx$	$z_2 =$	$z_2 \approx$	$o =$	$o \approx$
0	0	$g(-15)$	0				
0	1						
1	0						
1	1						

$$o = g(-5 + 10 \cdot g(-15 + 10x_1 + 10x_2) + 10 \cdot g(5 - 10x_1 - 10x_2))$$

# Aufgabe

Welche Boolesche Funktion wird durch dieses Neuronale Netz berechnet?

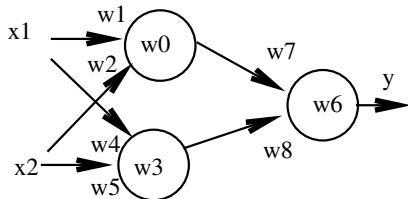


$x_1$	$x_2$	$z_1 =$	$z_1 \approx$	$z_2 =$	$z_2 \approx$	$o =$	$o \approx$
0	0	$g(-5)$	0				
0	1						
1	0						
1	1						

## Training (Rummelhart/Hinton 86)

Bisher: Wir haben bestimmt, welche Funktion durch ein Netz mit gegebenen Parameterwerten ausgerechnet wird.

Nun: Wir möchten, dass das Netz eine bestimmte Funktion realisiert. Wie müssen wir die Parameter einstellen?

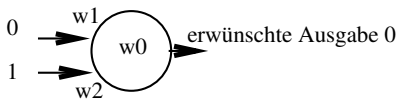


$x_1$	$x_2$	$y$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

$$y = h_w(x) = g(w_6 + w_7 \cdot g(w_0 + w_1 x_1 + w_2 x_2)) + w_8 \cdot g(w_3 + w_4 x_1 + w_5 x_2))$$

Aufgabe: finde  $w_0$  bis  $w_8$ , so dass die gegebene Funktion berechnet wird. Man sagt, das Netz lernt die Parameter.

# Intuition für Trainingsschritt



Parameterwerte:  $w_0 = 0.2$ ,  $w_1 = 0.1$  und  $w_2 = -0.2$ .

Trainingsbeispiel: an Eingabe  $(0, 1)$  soll die Ausgabe  $0$  sein. Im allgemeinen gibt es viele Trainingsbeispiele.

Das Netz gibt aus:

$$h_w(0, 1) = g(0.2 + 0.1 \cdot 0 - 0.2 \cdot 1) = g(0) = 1/2.$$

Um den Fehler zu reduzieren, sollten wir  $h_w(0, 1)$  verringern. Dazu müssen wir

$$z = w_0 + 0 \cdot w_1 + 1 \cdot w_2$$

verringern. Also  $w_0$  und  $w_2$  etwas verringern und  $w_1$  gleich lassen.

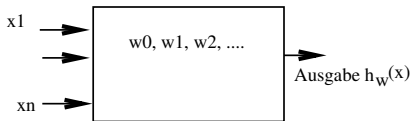
## Training II

Jedes Trainingsbeispiel (für ein Netz mit  $n$  Eingaben und einem Ausgang) besteht aus einem Eingabevektor  $x = (x_1, \dots, x_n)$  und einer Ausgabe  $y$ .

Wir haben  $N$  Trainingsbeispiele  $(x^{(1)}, y_1), \dots, (x^{(N)}, y_N)$ .

$w$  = Vektor aller Parameter (alle  $w_i$ 's).

$h_w(x)$  = Ausgabe (Hypothese) des Netzes mit Parametersatz  $w$  bei Eingabe  $x = (x_1, \dots, x_n)$



Training soll Parametersatz  $w$  finden, so dass Hypothesen des Netzes und korrekte Ausgaben möglichst gut übereinstimmen.

Was heißt gut übereinstimmen?  
Wie findet man Parametersatz?

Fehler am Trainingsbeispiel  $(x, y)$ :  $(y - h_w(x))^2$

Gesamtfehler  $E$  = Summe der Einzelfehler über alle Trainingsbeispiele

$$E = E(w) = \sum_{i=1}^N (y_i - h_w(x^{(i)}))^2.$$

Beachte: Der Gesamtfehler ist eine Funktion der Parameter  $w$ . Die Paare  $(x^{(i)}, y_i)$ ,  $1 \leq i \leq N$ , sind die Trainingsbeispiele. Sie sind gegeben und fest.

Präzisierung des Ziels des Trainings: Bestimme einen Parametersatz, der den Gesamtfehler minimiert.



# Newton Iteration zum Finden des Minimums von $E(w)$ .

- wähle eine Anfangslösung  $w$  und eine kleine Schrittweite  $h$ .
- iteriere:

- bestimme den Gradienten (= Vektor der partiellen

Abteilungen)

$$\nabla E(w) = \begin{pmatrix} \frac{\partial E(w)}{\partial w_0} \\ \dots \\ \frac{\partial E(w)}{\partial w_k} \end{pmatrix}$$

- mache einen Schritt in Richtung des (negativen) Gradienten

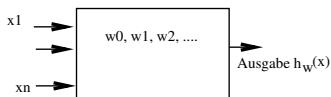
$$w^{neu} = w^{alt} - h \cdot \nabla E(w^{alt})$$

bis sich der Funktionswert kaum mehr ändert.



# Der Trainingsalgorithmus (Back Propagation)

- 1) Initialisiere die Parameter mit kleinen zufälligen Werten
- 2) Solange nicht zufrieden, d.h. Gesamtfehler  $E$  zu groß:



$$E = E(w) = \sum_{i=1}^N (y_i - h_w(x^{(i)}))^2$$

Mache einen kleinen Schritt in Richtung des negativen Gradienten, d.h.,  
falls  $w$  der augenblickliche Wert des Parametersatzes ist, dann  
sind die neuen Werte

$$w_i^{(neu)} = w_i - h \frac{\partial E(w)}{\partial w_i} \quad w^{(neu)} = w - h \cdot \nabla E(w).$$

**Bemerkung:** es gibt einen einfachen Alg, um alle partiellen Ableitungen zu bestimmen (siehe Übungen).

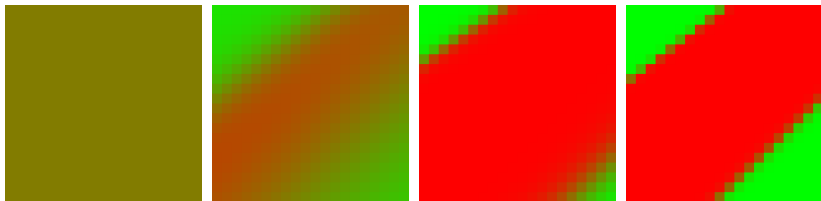
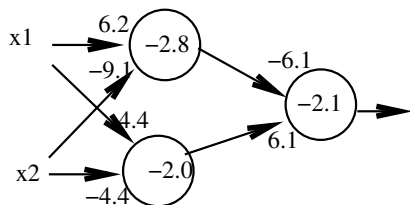
## Beispiel für das Ergebnis eines Trainings

16 Trainingsbeispiele:

$x_1$  und  $x_2$  in  $\{0, 0.1, 0.9, 1\}$

$y = 1$  genau wenn  $x_1 \approx x_2$

In 50000 Iterationen wurden folgende Parameter bestimmt.



# Unterscheide T und C

Aufgabe: in einem 25 x 25 Pixelbild befindet sich ein T oder C in einer der vier möglichen Orientierungen; fünf Pixel sind Eins, die anderen sind Null.

Bestimme ein neuronales Netz (einfacher Architektur), das T und C unterscheidet.

einfach: alle Neuronen der ersten Schicht schauen sich eine 3 x 3 Matrix an und sind identisch, d.h. haben die gleichen Parameter.

Ausgabeneuron hängt von allen Neuronen der ersten Schicht ab.

Anzahl der Parameter =  $10 + (25 - 3 + 1)^2 + 1$ .

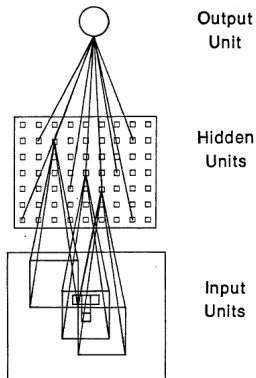
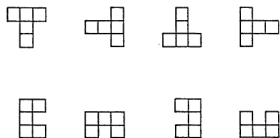
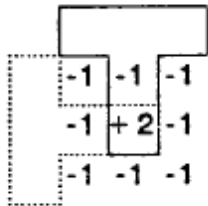


FIGURE 14. The network for solving the T-C problem. See text for explanation.

A



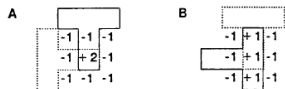
Wenn die Mitte des Filter auf dem Fuß des T's liegt, liefert der Filter eine +1.

Bei einem C erzeugt der Filter immer einen Wert kleiner gleich 0.

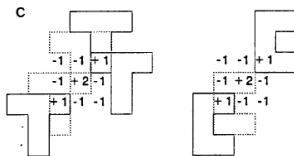
Neuron der ersten Schicht =

$$g(-5 + 20 \cdot \text{Mittelpixel} - 10 \cdot \text{Summe der Randpixel})$$

Ausgabeneuron = Oderverknüpfung aller Neuronen der ersten Schicht



Training fand vier verschiedene Lösungen.



Aufgabe: finde heraus, wie B und C funktionieren.

D ist besonders interessant: es funktioniert weil ein C 20 Rezeptoren überlappt und ein T 21 Rezeptoren.

**D**

-2 -2 -2  
 -2 -2 -2  
 -2 -2 -2

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	1	1	1	0
0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	1	1	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

- 1.2 Millionen Trainingsbeispiele aus 1000 Klassen.
- Bilder haben 224 x 224 Pixel jeweils mit 3 Farbwerten (0 bis 255)
- Netzwerk hat 8 Schichten, 650000 Neuronen, 60 Millionen Parameter
- Ausgabeschicht hat 1000 Neuronen, eins pro Klasse
- Training dauerte 1 Woche

# Klassifikation: Rechtecke = Erregung der Ausgabeneuronen

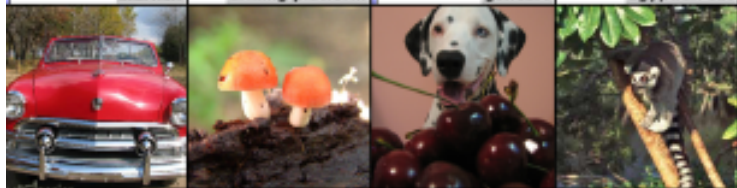


mite

container ship

motor scooter

leopard

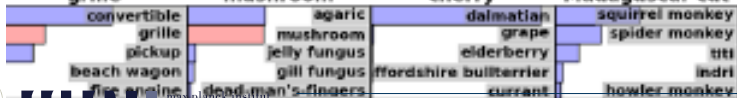


grille

mushroom

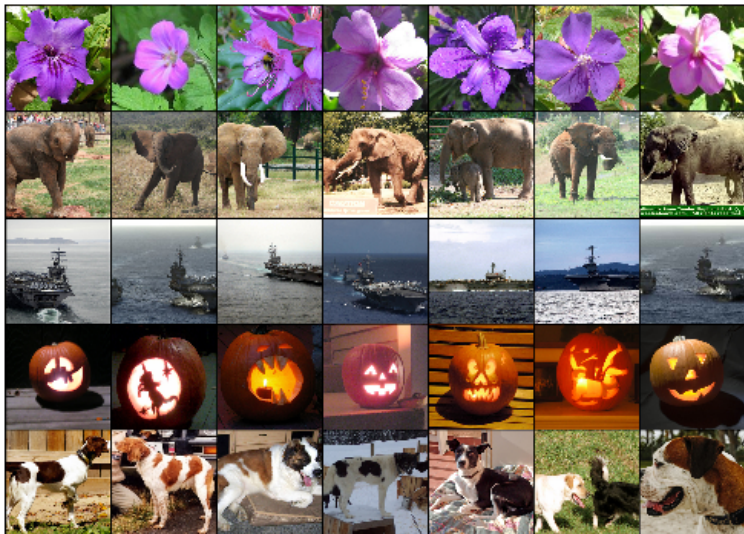
cherry

Madagascar cat

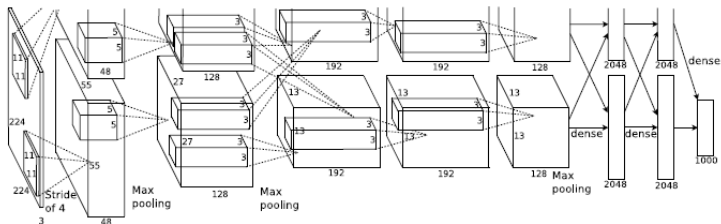




# Suche: Suchbild in Spalte 1, Trainingsbilder mit ähnlichster Erregung der Ausgabeneuronen







- Eingabe: 224 x 224 Pixel mit jeweils 3 Farbwerten
- Schicht 1: 96 verschiedene Neuronen in 55 x 55 Matrix; jedes Neuron sieht 11 x 11 Feld der Eingabe; Shift von 4.
- Schicht 2: 256 verschiedene Neuronen in 27 x 27 Matrix; jedes Neuron sieht 5 x 5 Feld der Schicht 1, also 31 x 31 Feld der Eingabe.
- Informationsreduktion:
  - 11 x 11 Fenster der Eingabe, 3 Farbwerte: 363 Zahlen
  - erste Schicht: Ausgabe von 96 Neuronen, 96 Zahlen

## Wie funktioniert das?

Neuronen der ersten Schicht entdecken Kanten, Linien, Bögen in 11 x 11 Feldern der Eingabe.

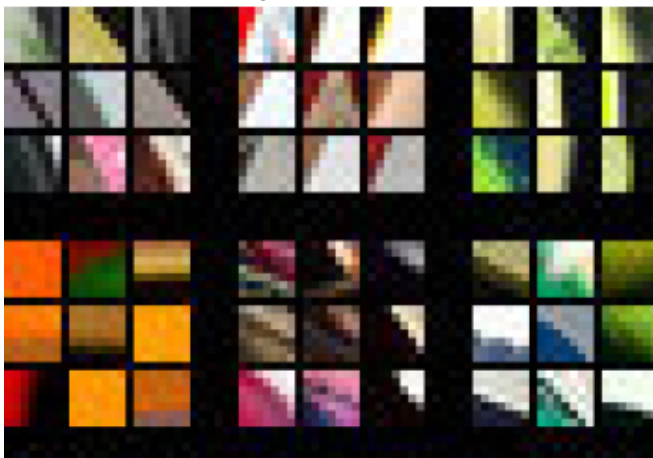


Abbildung zeigt Eingaben, bei denen 6 ausgewählte Neuronen der ersten Schicht besonders stark ansprechen.

## Wie funktioniert das?

Neuronen der zweiten Schicht entdecken komplexere Merkmale in 31 x 31 Feldern der Eingabe.

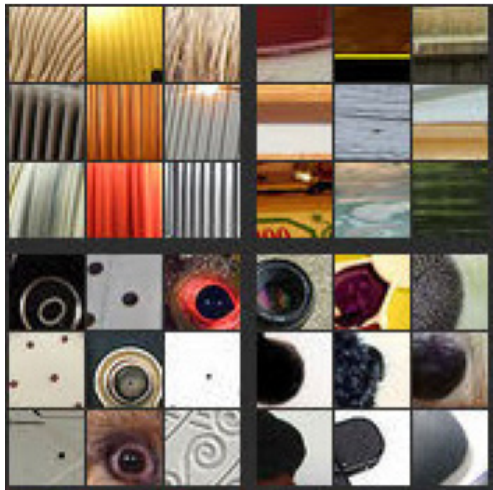


Abbildung zeigt Eingaben, bei denen 4 ausgewählte Neuronen der zweiten Schicht besonders stark ansprechen.

## Wie funktioniert das?

Neuronen der dritten Schicht entdecken noch komplexere Merkmale in wiederum größeren Feldern der Eingabe.

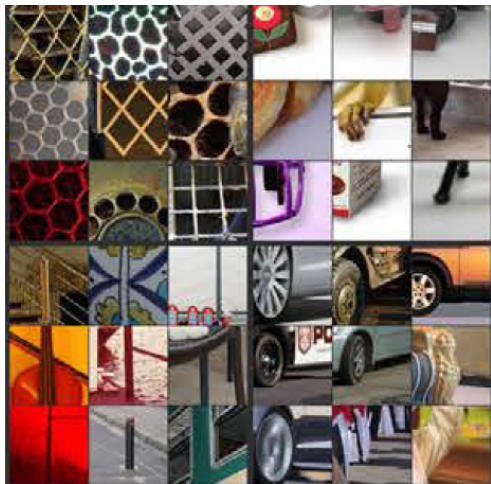


Abbildung zeigt Eingaben, bei denen 4 ausgewählte Neuronen der dritten Schicht besonders stark ansprechen.

# Wie funktioniert das?

Neuronen der vierten Schicht entdecken noch komplexere Merkmale in wiederum größeren Feldern der Eingabe.

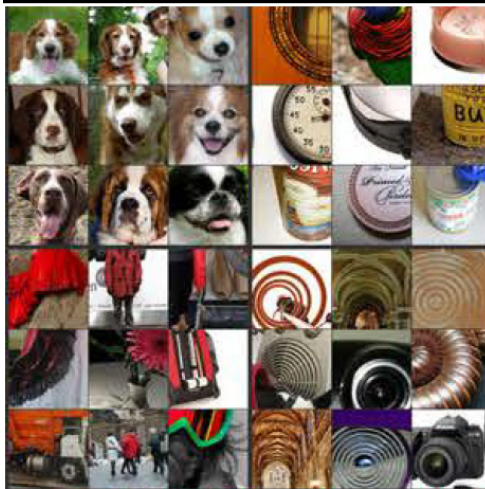


Abbildung zeigt Eingaben, bei denen 4 ausgewählte Neuronen der vierten Schicht besonders stark ansprechen.

## Wie funktioniert das?

Neuronen der fünften Schicht entdecken noch komplexere Merkmale in wiederum größeren Feldern der Eingabe.

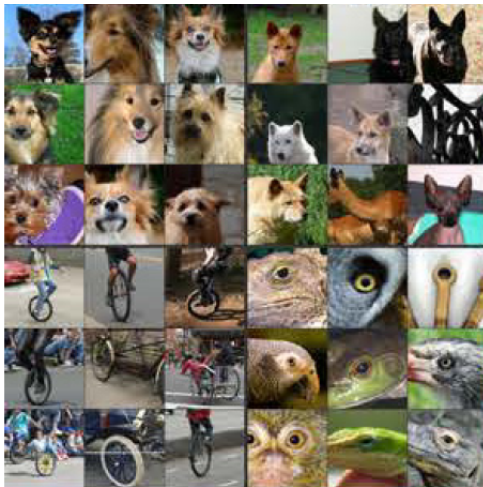


Abbildung zeigt Eingaben, bei denen 4 ausgewählte Neuronen der fünften Schicht besonders stark ansprechen.



Neuronale Netze mit vielen Schichten (deep networks) haben Durchbruch in Bilderkennung, Handschriftenerkennung, und Spracherkennung geschafft.

Je höher die Schicht, desto komplexere Merkmale werden erkannt; Merkmale auf einer Schicht sind Kombinationen von Merkmalen auf der vorherigen Schicht.

Training braucht sehr große Datensätze, die seit einigen Jahren durch soziale Netzwerke und Crowdsourcing zur Verfügung stehen.

Training ist aufwendig und dauert sehr lange, aber das ist auch bei Menschen so (mit 18 Monaten verknüpften meine Enkel das Wort Elefant mit dem Bild eines Elefanten).

Daher Durchbruch erst jetzt, obwohl Technik seit mehr als 25 Jahren bekannt.