

# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

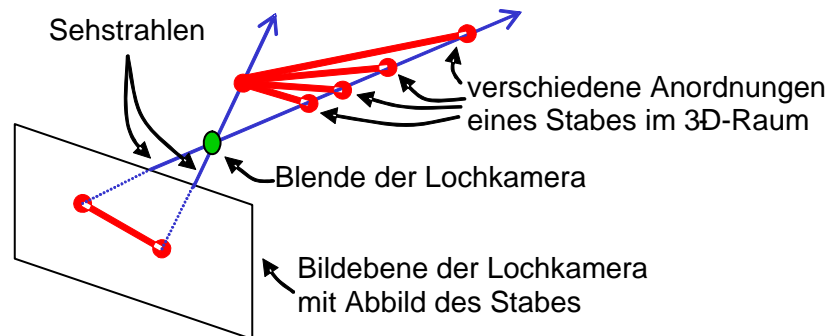
## In den folgenden Kapiteln:

3D-Strukturen aus 2D-Bildern!

- photogrammetrische Stereobilder (gleichzeitig mehrere Kamera-Positionen)
- Bildfolgen (bewegte Kamera oder bewegte Szene oder beides)
- photometrische Stereo-Bilder (unbewegte Szene und Kamera aber nacheinander unterschiedliche Beleuchtung)

## **Vorbemerkung:**

3D-Struktur aus einem 2D-Bild geht eigentlich nicht ...  
... da bei Projektion ins Bild Verlust einer Dimension!



Der Mensch kann's in der Regel trotzdem:

Ableitung von 3D-Szenen-Merkmalen aus einem 2D-Bild

- Orientierung von Oberflächen
- Abstände zur Kamera



Quelle: <http://www.geocities.com/krosbert/wuerfel.jpg>

# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

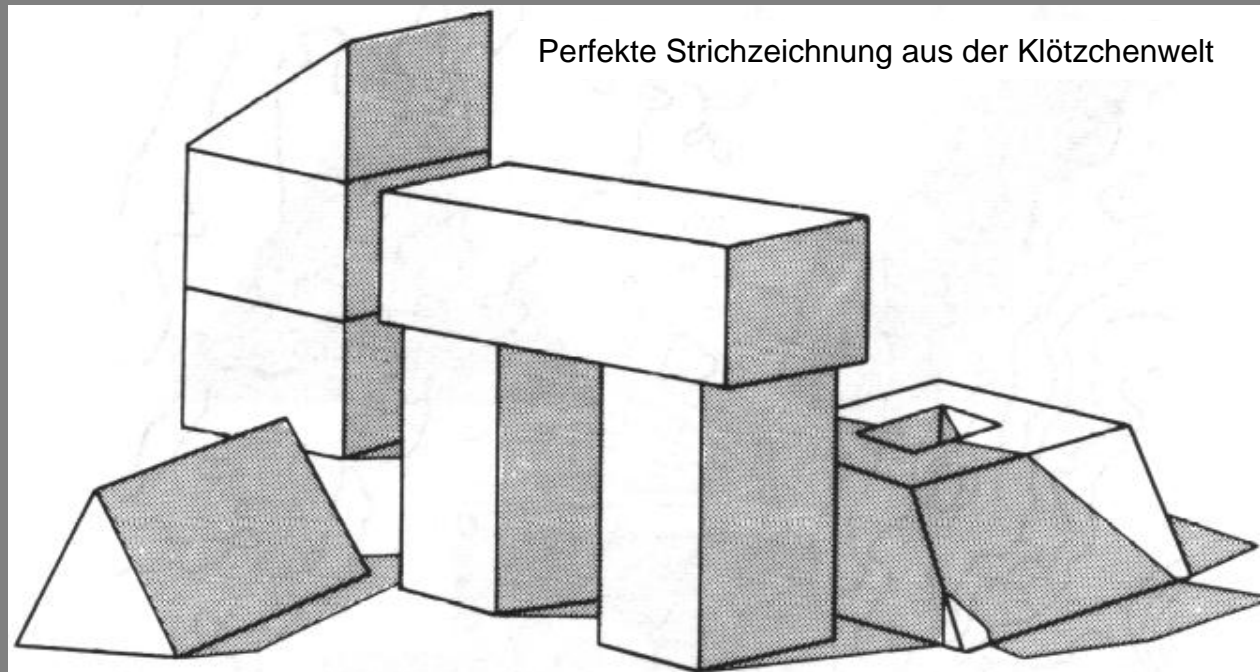
## Große Rolle von „Modellen“:

- Beleuchtungs- und Reflektions-Modell (siehe Graphische DV);
- Sensor-Modell (z.B. Loch-Kamera)
- Welt-Modell (z.B. Klötzchen-Welt; siehe unten)

## Im Weiteren:

Einschränkung auf Klötzchen-Welt statt echter Welt;

(hat nur noch historische Bedeutung, aber dort entwickelte Werkzeuge noch aktuell)



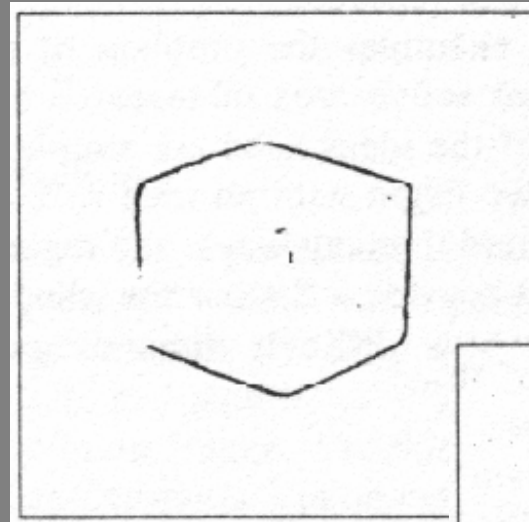
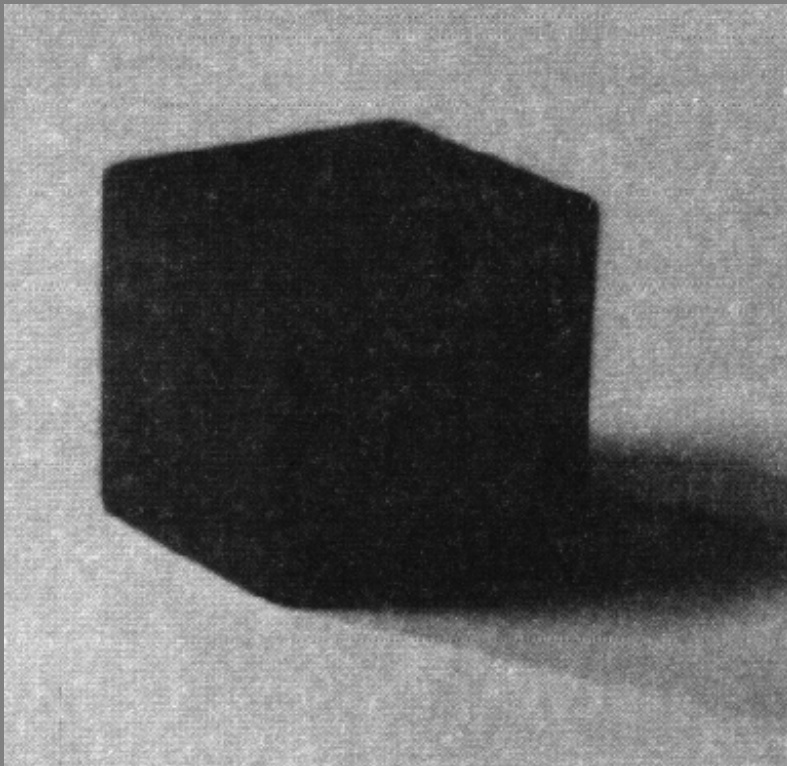
Quelle: „Künstliche Intelligenz“,  
P. H. Winston, Addison Wesley



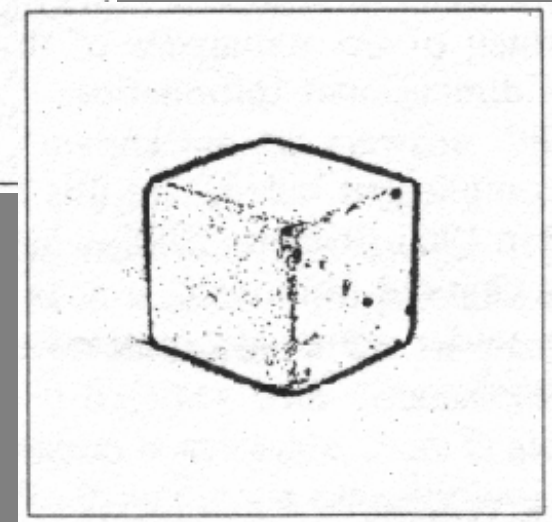
# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

## Klötzchen-Welt:

- einfache, überschaubare Gegebenheiten;
- Hoffnung, dass sich perfekte Strichzeichnungen ergeben
- ... und später die entwickelten Verfahren auf die reale Welt übertragbar sind.



Originalbild und  
Binarisierungen des  
Kantenbildes mit zu  
hohem bzw. zu  
niedrigem Schwellwert



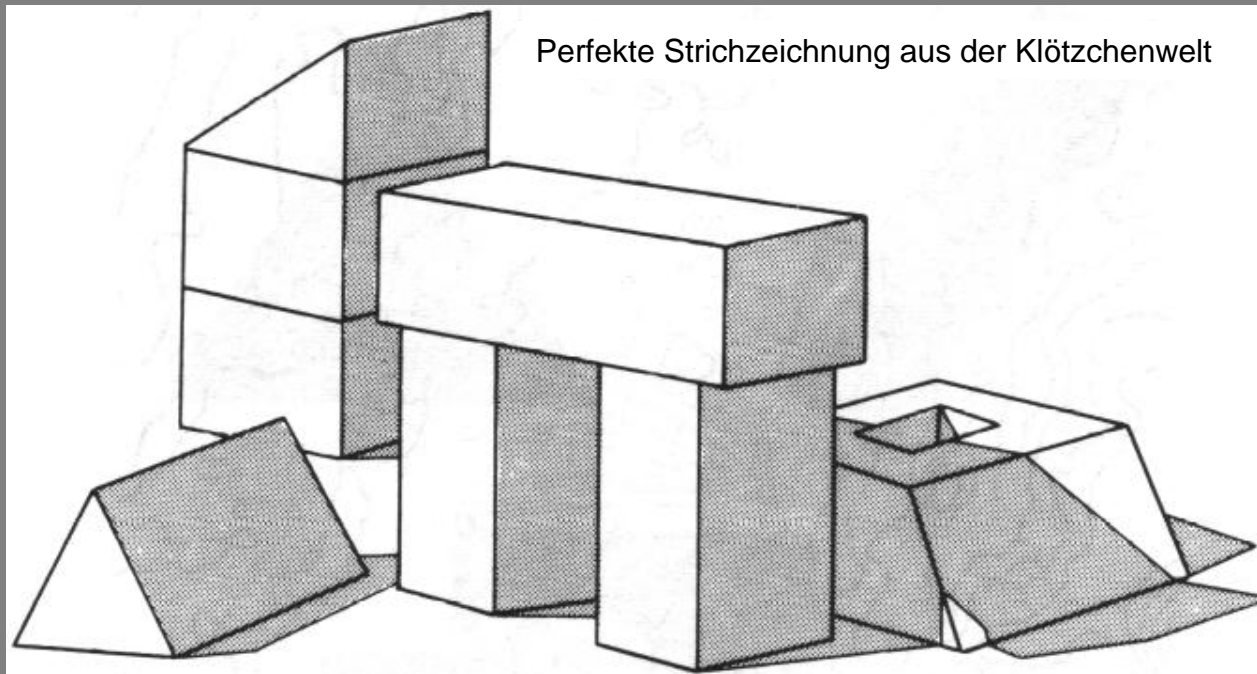
Quelle: „Computer Vision“, R. D. Boyle, R. C. Thomas, Blackwell Scientific Publications



# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

## Vereinfachungen:

- 1.) keine Schatten,
- 2.) keine Löcher,
- 3.) keine Spalten,
- 4.) genau 3 Flächen an jeder Ecke,
- 5.) Verdeckungen zulässig.



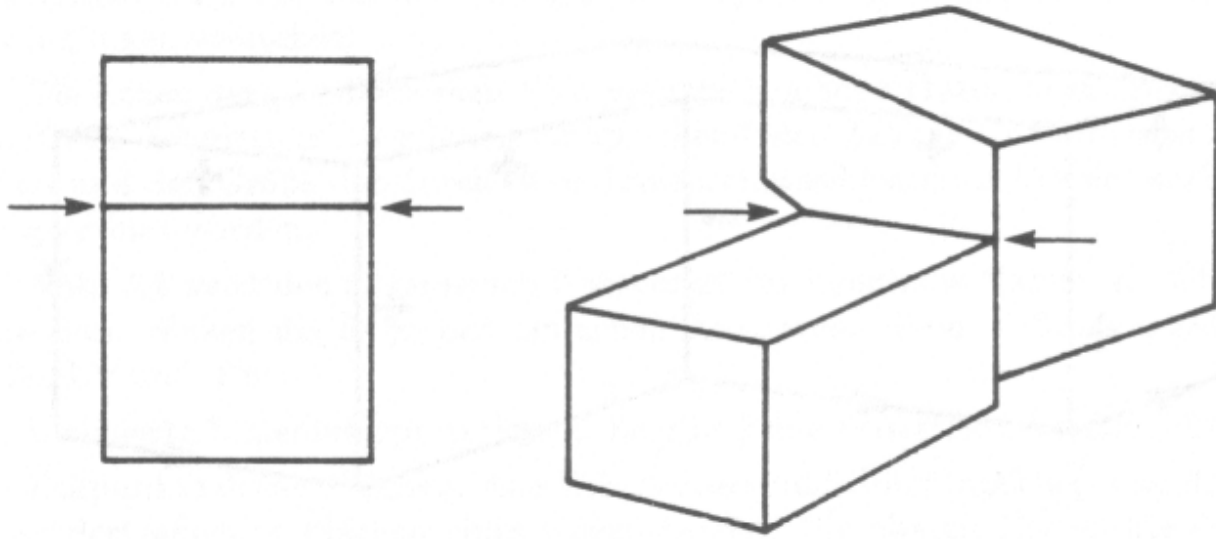
Quelle: „Künstliche Intelligenz“,  
P. H. Winston, Addison Wesley



# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

## Weitere Forderung: „allgemeiner Kamera-Standort“

„Bedeutung“ einer Linie bzw. eines Linienschnittpunkts darf sich bei geringfügiger Änderung des Kamera-Standorts nicht grundlegend ändern!



Verstoß gegen die Forderung nach einem allgemeinen Kamera-Standort

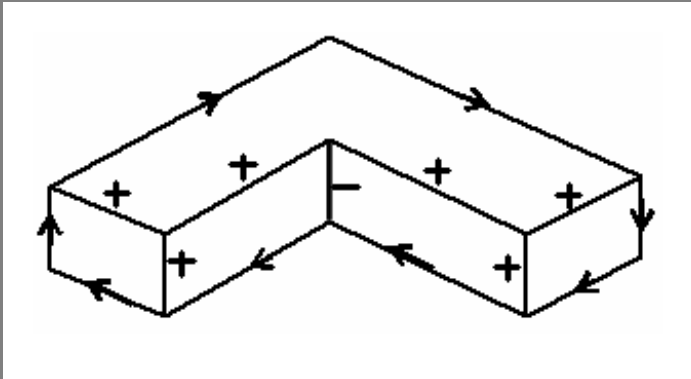
Quelle: "Künstliche Intelligenz", P. H. Winston, Addison Wesley



# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

## Vorüberlegung:

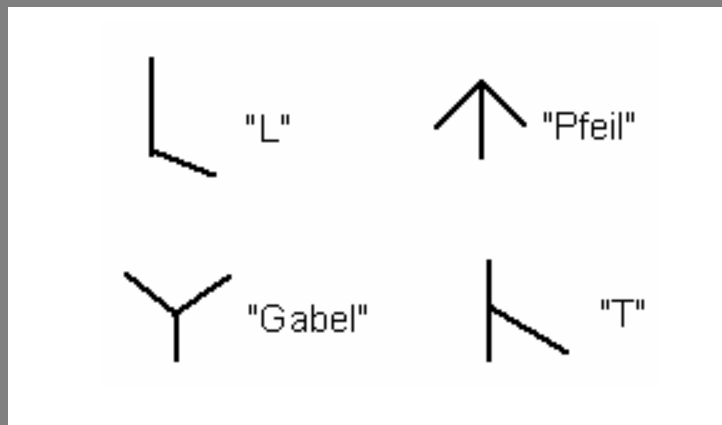
1.) Was für verschiedene Linien-Bedeutungen sind möglich?



Es gibt nur 4 verschiedene Arten von Linien:

- + (konvexe Kante),
- (konkave Kante),
- >- und -<- (Kontur-Kanten)

2.) Was für verschiedene Linienschnittpunkte sind möglich?

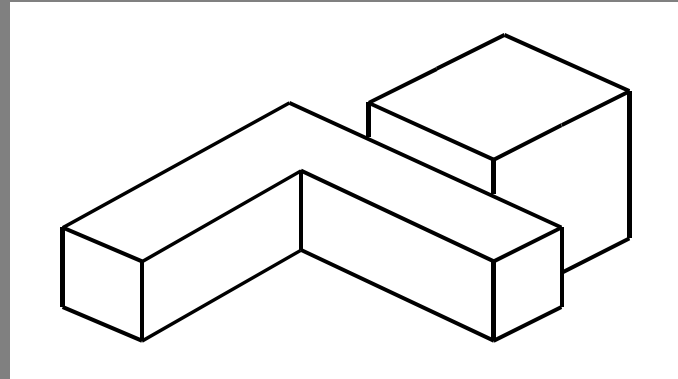


Es gibt nur 4 verschiedene Linienschnittpunkte



# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

T-Kreuzungen: Hinweis auf eine Verdeckung



Wie viele Markierungs-Möglichkeiten gibt es rein rechnerisch für eine „Gabel“?  
(Auswahl: + , - , ->- und -<-)



Lösung: 3 Arme mit je 4 möglichen Markierungen, d.h.  $4^3 = 64$  Markierungen ...  
... in der Realität aber nur 3 Möglichkeiten!

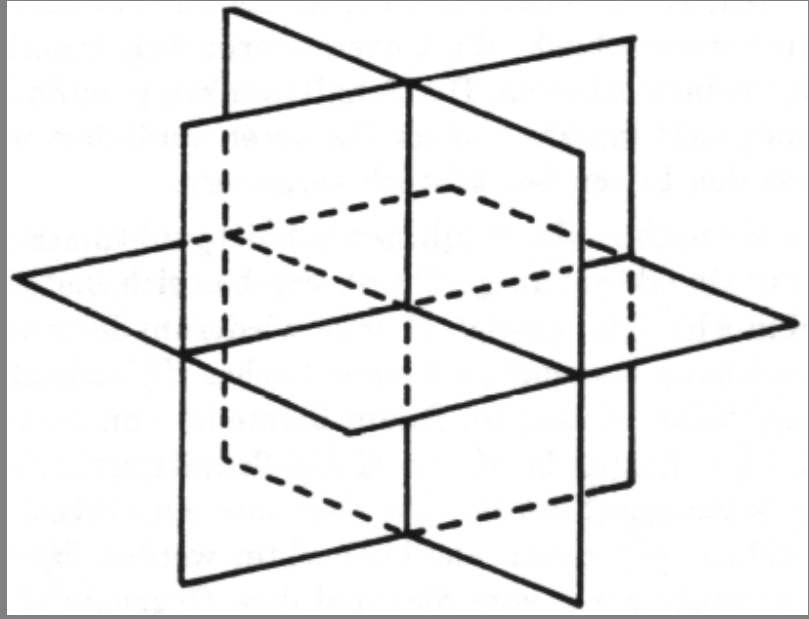
Die Suche nach den tatsächlichen Möglichkeiten muss systematisch durchgeführt werden!



# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

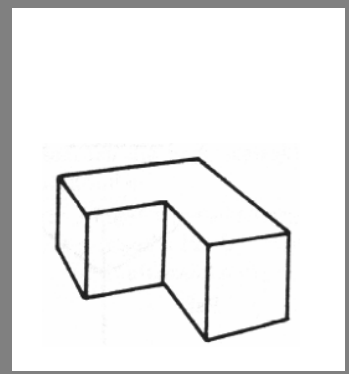
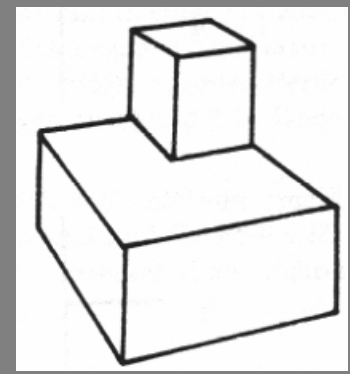
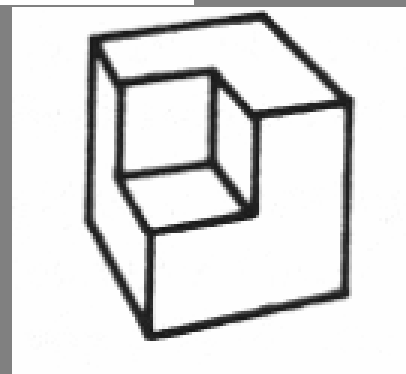
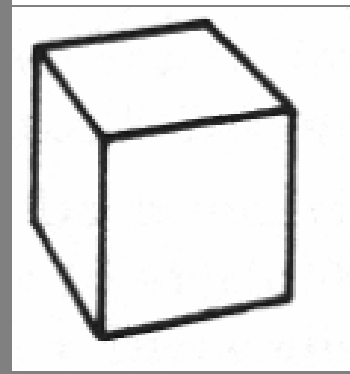
Die Suche nach den tatsächlichen Möglichkeiten muss systematisch durchgeführt werden!

Überlegungen zu möglichen  
Linienschnittpunkts-Markierungen:  
Unterteilung des Raumes in 8 Teilräume



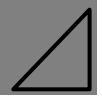
Quelle: „Künstliche Intelligenz“,  
P. H. Winston, Addison Wesley

Einige mögliche Raum-Belegungen:



Wolf-Dieter Groch; Hochschule Darmstadt; FBI

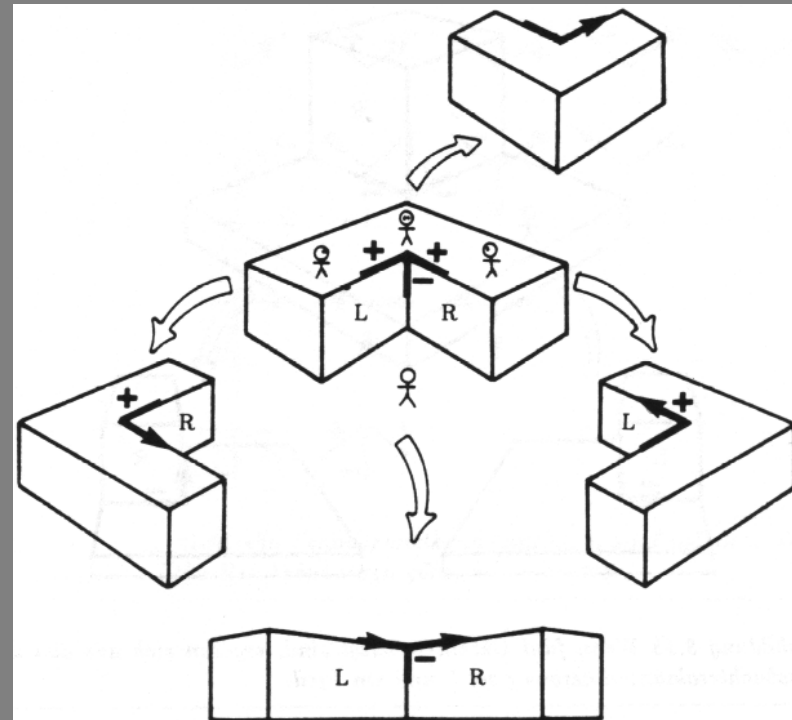
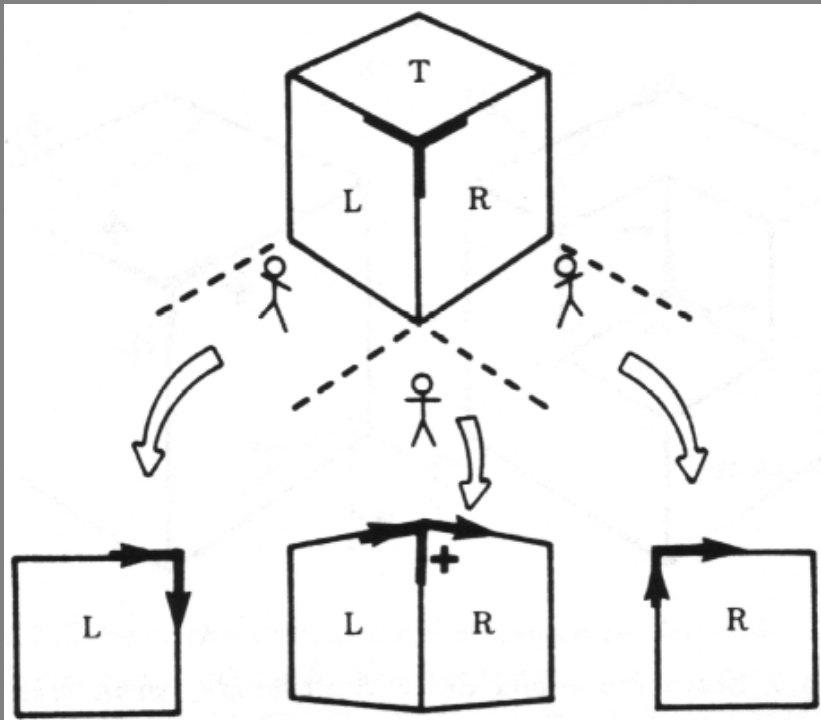
Quelle: „Künstliche Intelligenz“,  
P. H. Winston, Addison Wesley



# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

Die Suche nach den tatsächlichen Möglichkeiten muss systematisch durchgeführt werden!

Einführung eines virtuellen Betrachters:

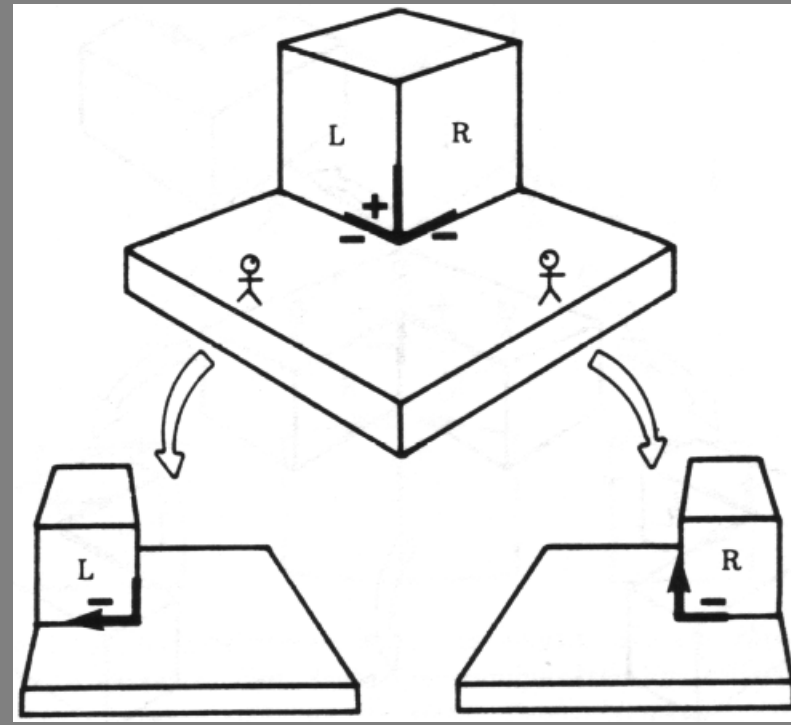
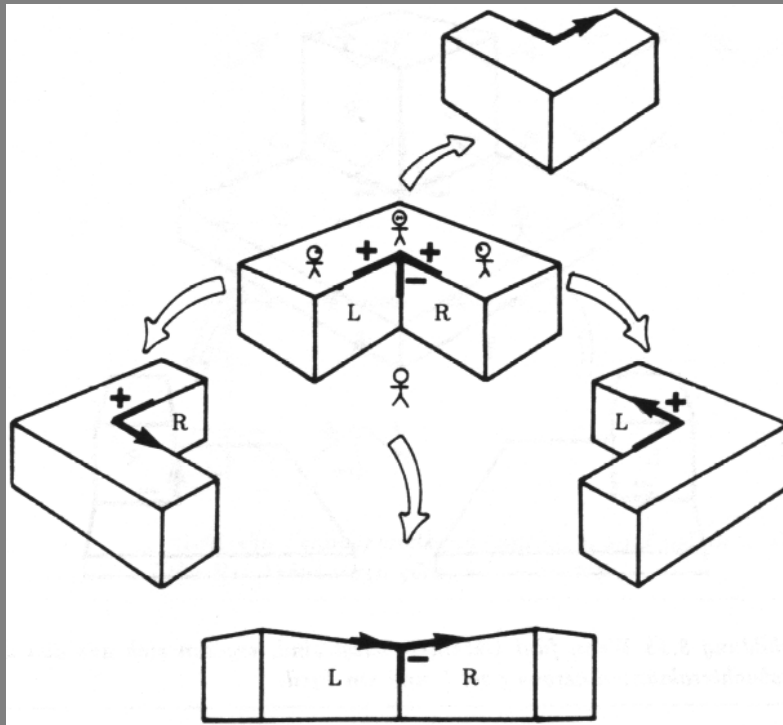


Quelle: „Künstliche Intelligenz“,  
P. H. Winston, Addison Wesley

# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

Die Suche nach den tatsächlichen Möglichkeiten muss systematisch durchgeführt werden!

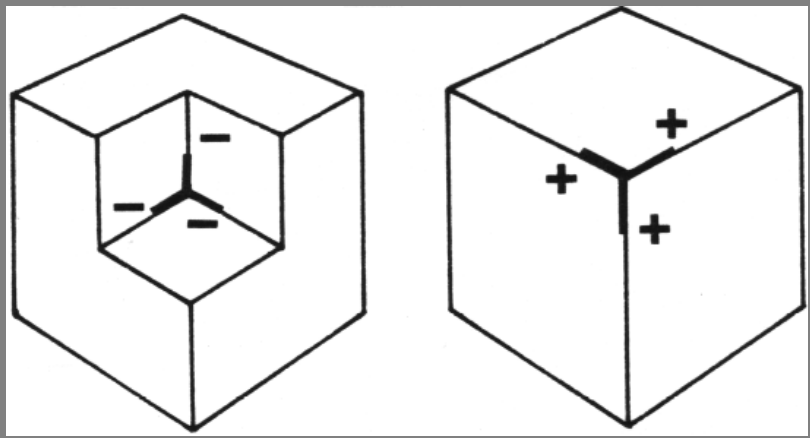
Einführung eines virtuellen Betrachters:



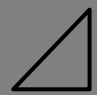
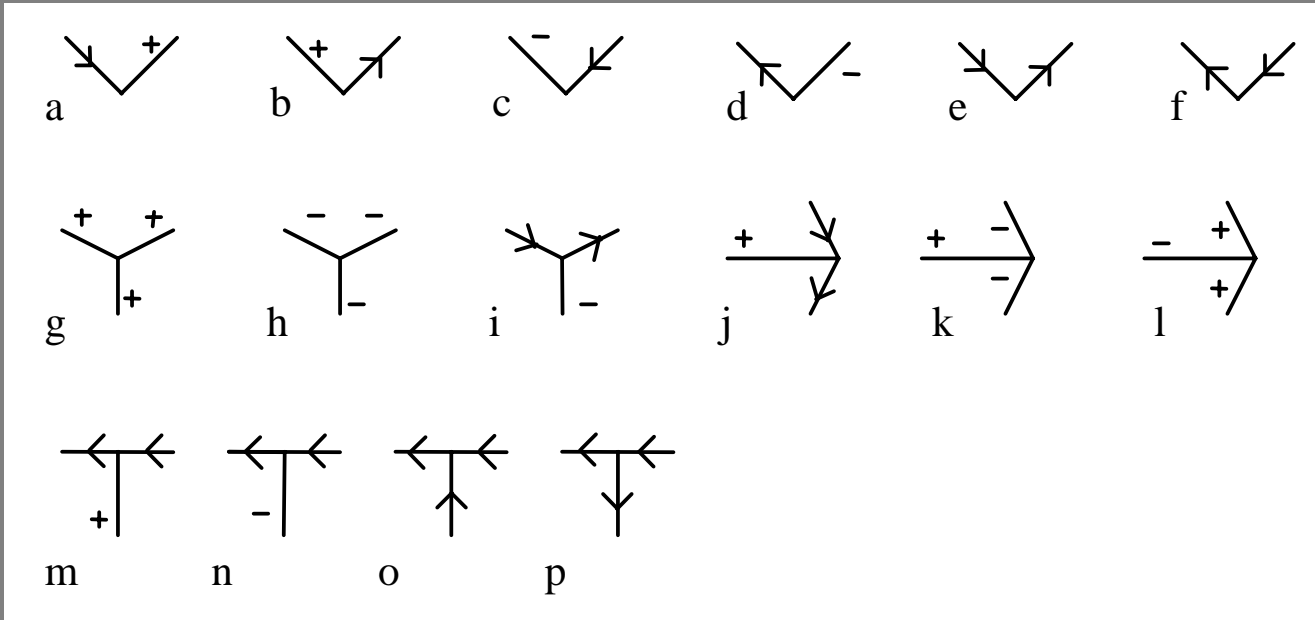
Quelle: „Künstliche Intelligenz“,  
P. H. Winston, Addison Wesley

# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

Zwei Möglichkeiten für eine „Gabel“:



Vollständiger Katalog aller real möglichen Linienschnittpunkts-Markierungen:



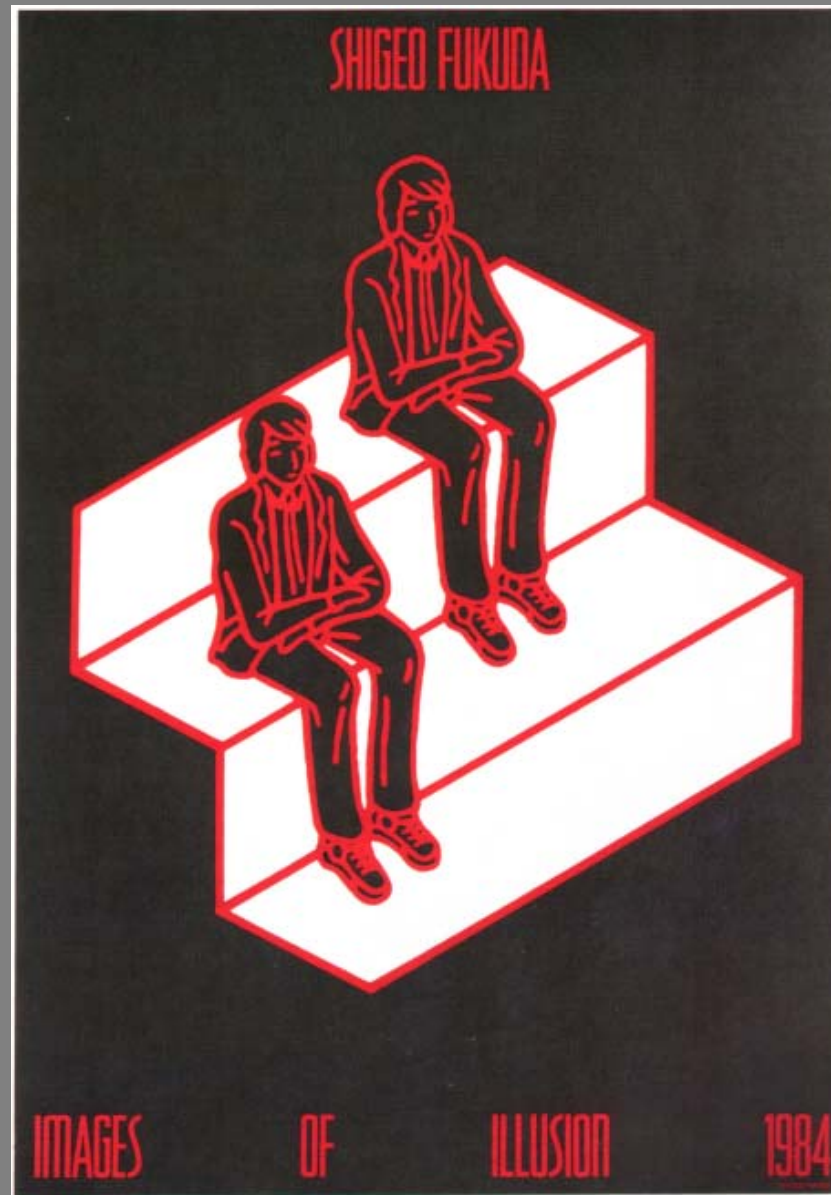
# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

## Jetzt das Vorgehen umdrehen:

Vorgelegte Strichzeichnung soll markiert werden!

## **Constraint, Zwangs-Bedingung:**

Linien müssen konsistent markiert werden,  
d.h. vorne und hinten dieselbe Markierung tragen!

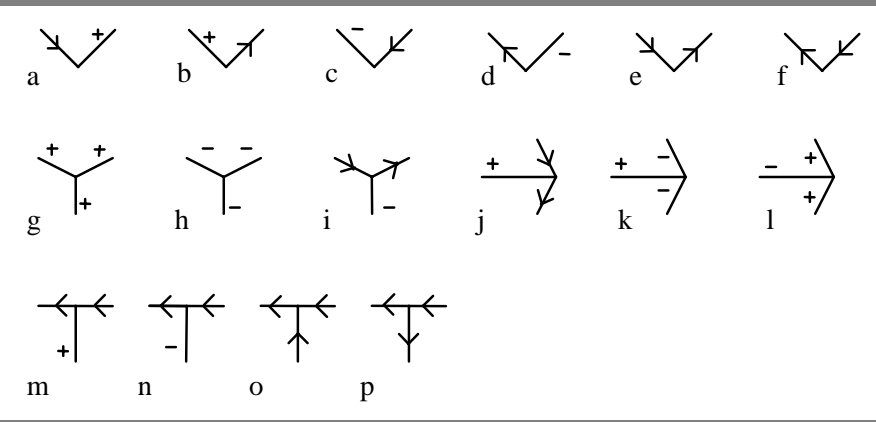


Quelle: „Das verzauberte Auge“,  
B. Ernst, Taco

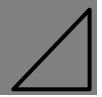
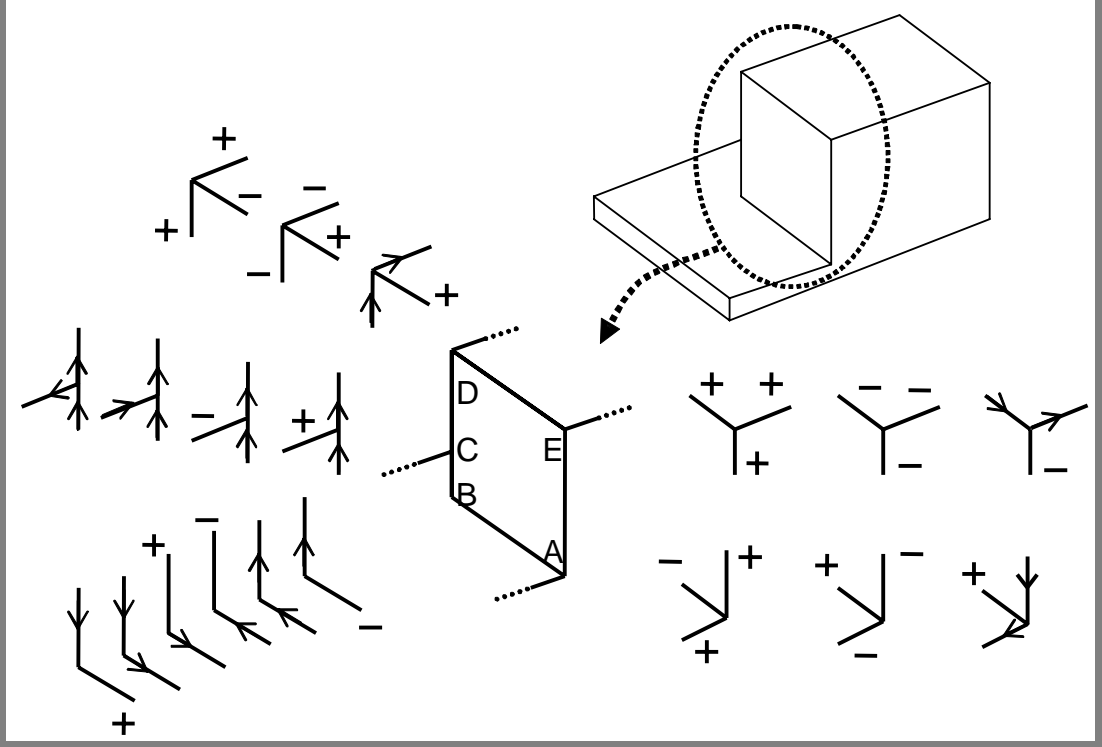
# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

**Jetzt das Vorgehen umdrehen:**  
 Vorgelegte Strichzeichnung soll  
 markiert werden!

**Katalog aller  
 Linienschnittpunkt-  
 Markierungen:**



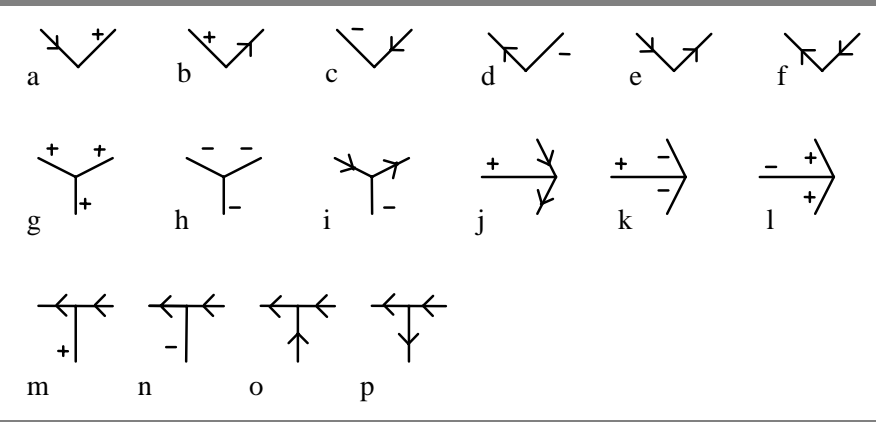
**1.) Ansatz (Brute Force):**  
 Alle möglichen Schnittpunkt-  
 Markierungen gegeneinander  
 testen.  
 (Kombinatorische Explosion!)



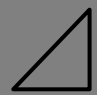
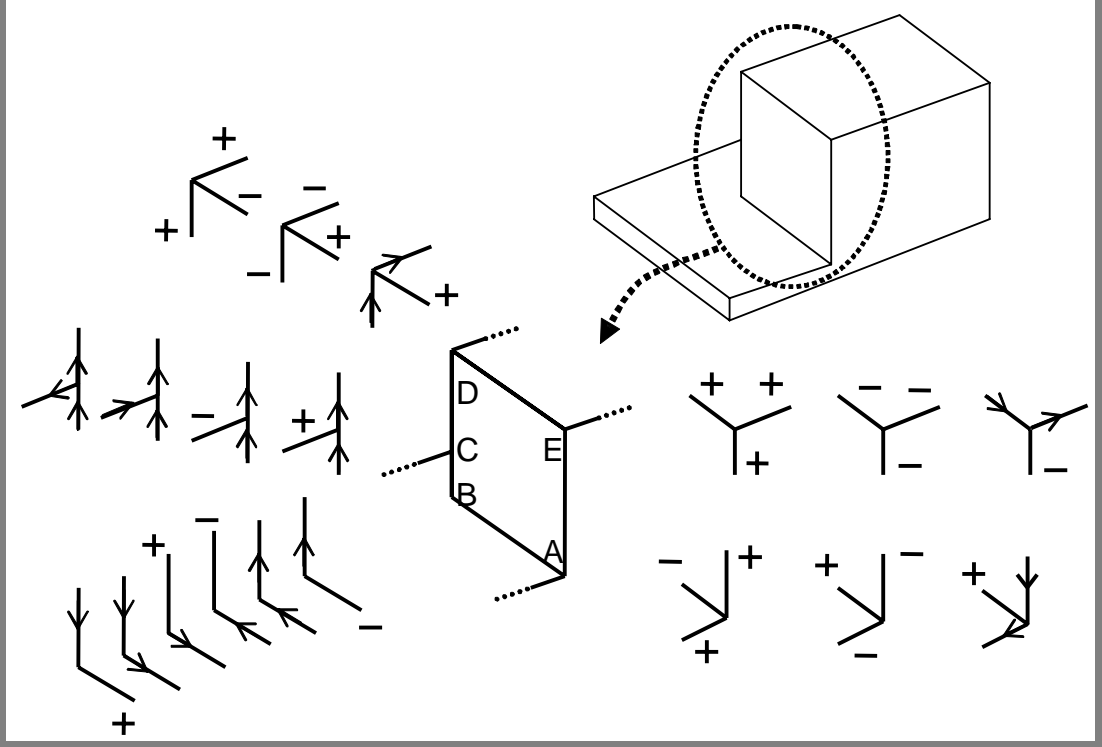
# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

**Jetzt das Vorgehen umdrehen:**  
 Vorgelegte Strichzeichnung soll markiert werden!

**Katalog aller Linienschnittpunkts-Markierungen:**



**2.) Ansatz (Sequentielles Markierungsverfahren):**  
 Von Start-Schnittpunkt ausgehend durch „Vorwärts-“ und „Rückwärts-Ausbreitung“ alle unmöglichen Markierungen eliminieren.



# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

## 3.) Ansatz (Paralleles Verfahren – Diskrete Relaxation):

Ein Relaxations-Verfahren ist ein iterativer Prozess, bei dem lokale Gegebenheiten durch ihren Kontext solange beeinflusst werden, bis sich ein konsistentes Ergebnis einstellt.



Prinzip der Relaxation

### **Diskrete Relaxation:**

paralleler iterativer Prozess, bei dem die Marken von Elementen durch Einfluss der Umgebung solange verändert werden, bis sich ein konsistentes Ergebnis einstellt.

### **hier:**

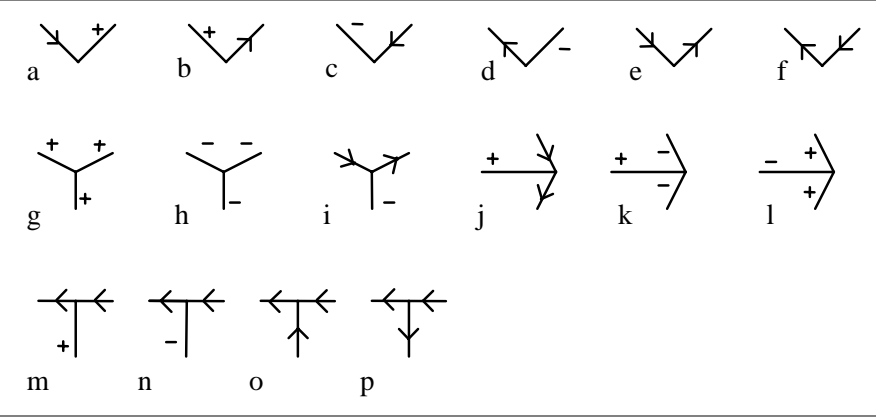
- \* Elemente = Linien-Schnittpunkte
- \* Marken = Markierungen aus Katalog
- \* Vertrauen =  $\{0,1\}$  (deshalb „diskrete“)
- \* Umgebung = benachbarte Linien-Schnittpunkte
- \* Konsistenz = Zwangs-Bedingung erfüllt, d.h. Linien an beiden Enden gleich markiert.



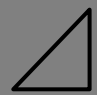
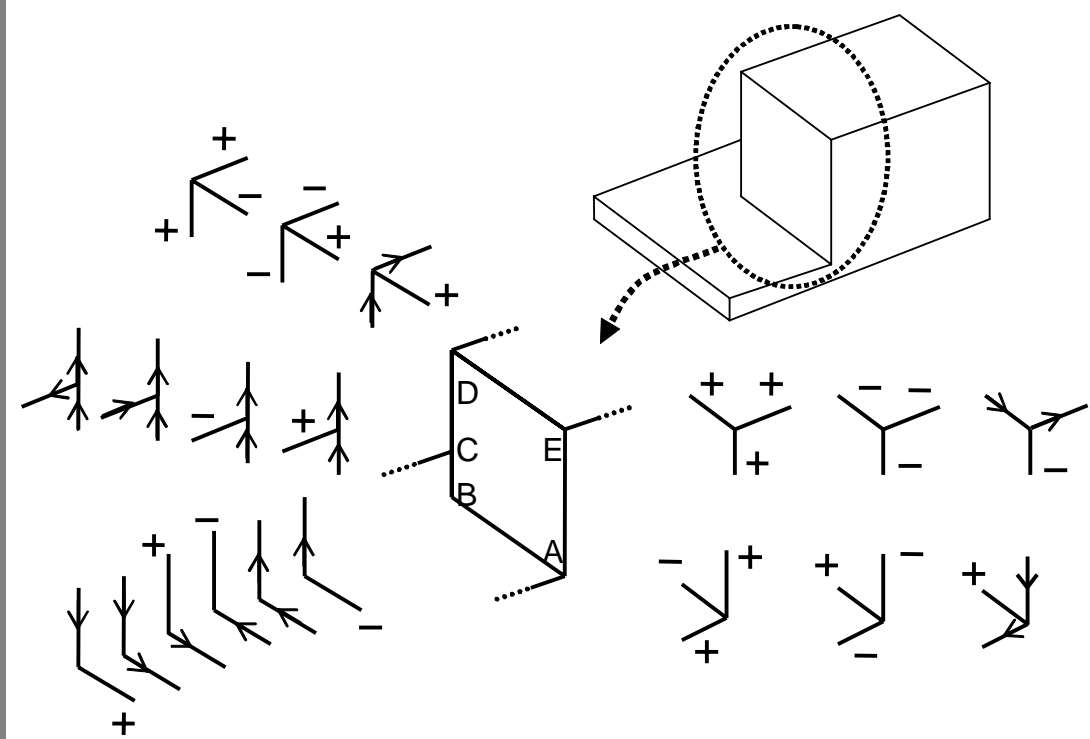
# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

**Jetzt das Vorgehen umdrehen:**  
 Vorgelegte Strichzeichnung soll  
 markiert werden!

**Katalog aller  
 Linienschnittpunkt-  
 Markierungen:**

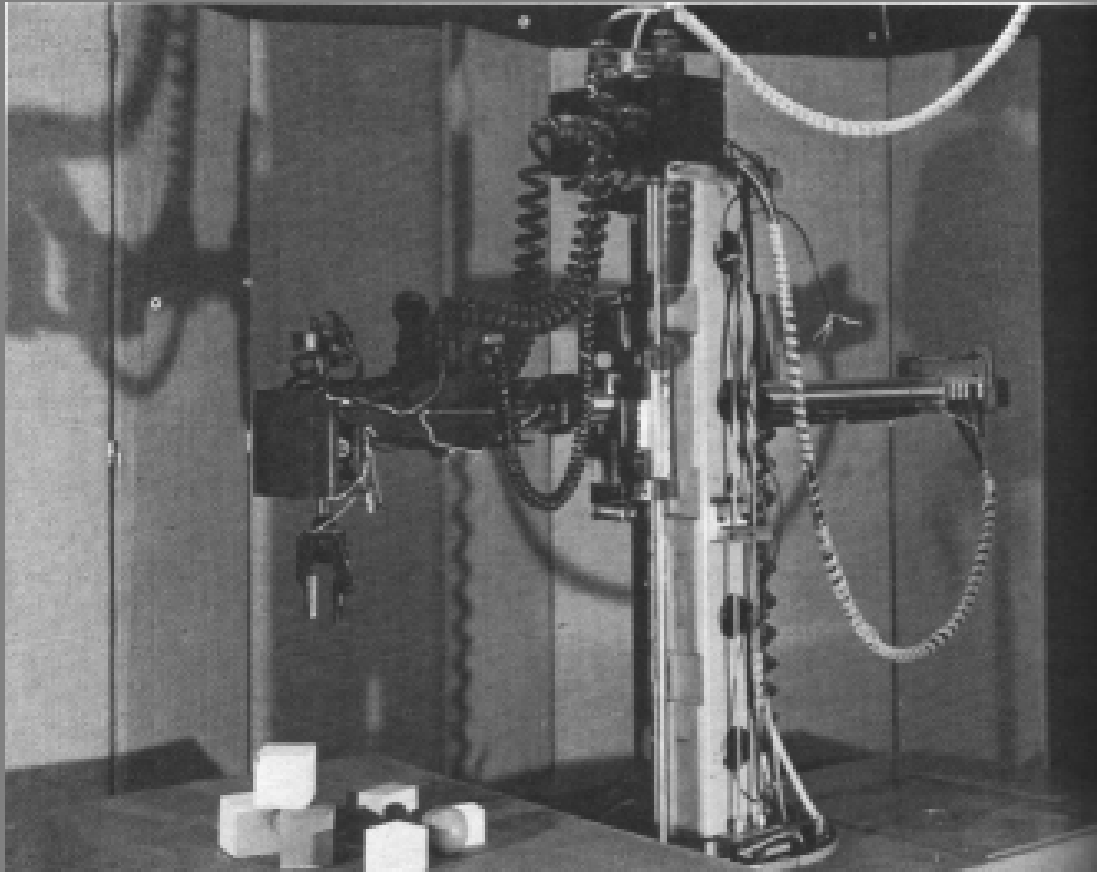


**3.) Ansatz (Diskrete Relaxation):**  
 Alle benachbarten Schnittpunkt-  
 Markierungen parallel, d.h. gleich-  
 zeitig miteinander vergleichen



# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

Erster Demonstrator zur Lösung von Problemen in der Klötzchenwelt !



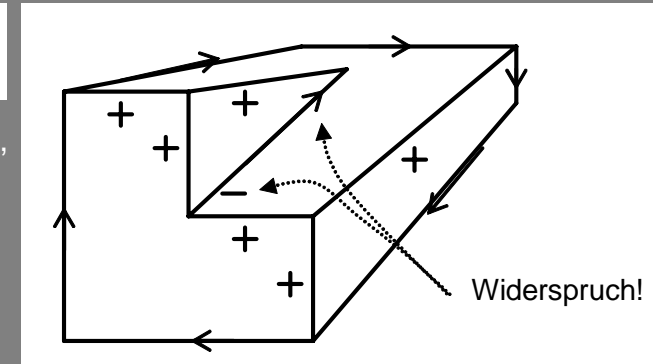
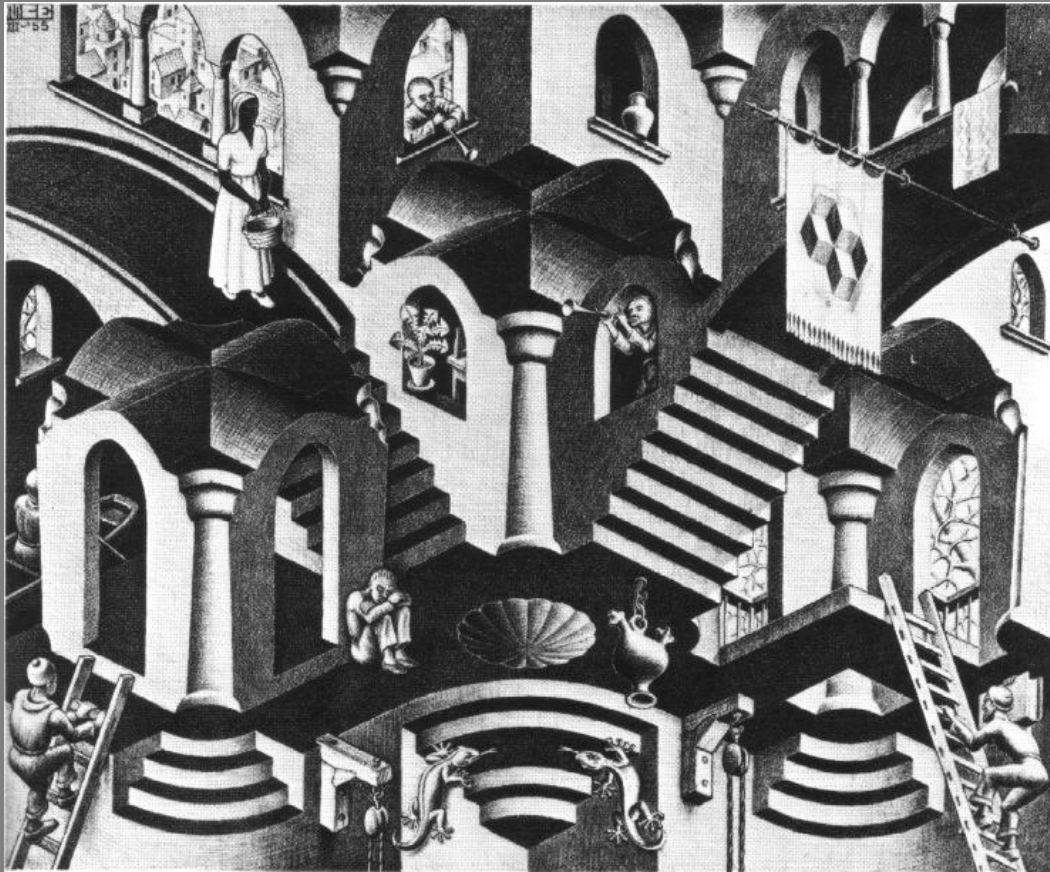
Quelle: „Robot Vision“, B. K. P. Horn,  
MIT Press



# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

„Enttarnung“ unmöglicher Objekte mittels Markierung von Strichzeichnungen

Quelle: „Robot Vision“, B. K. P. Horn, MIT Press

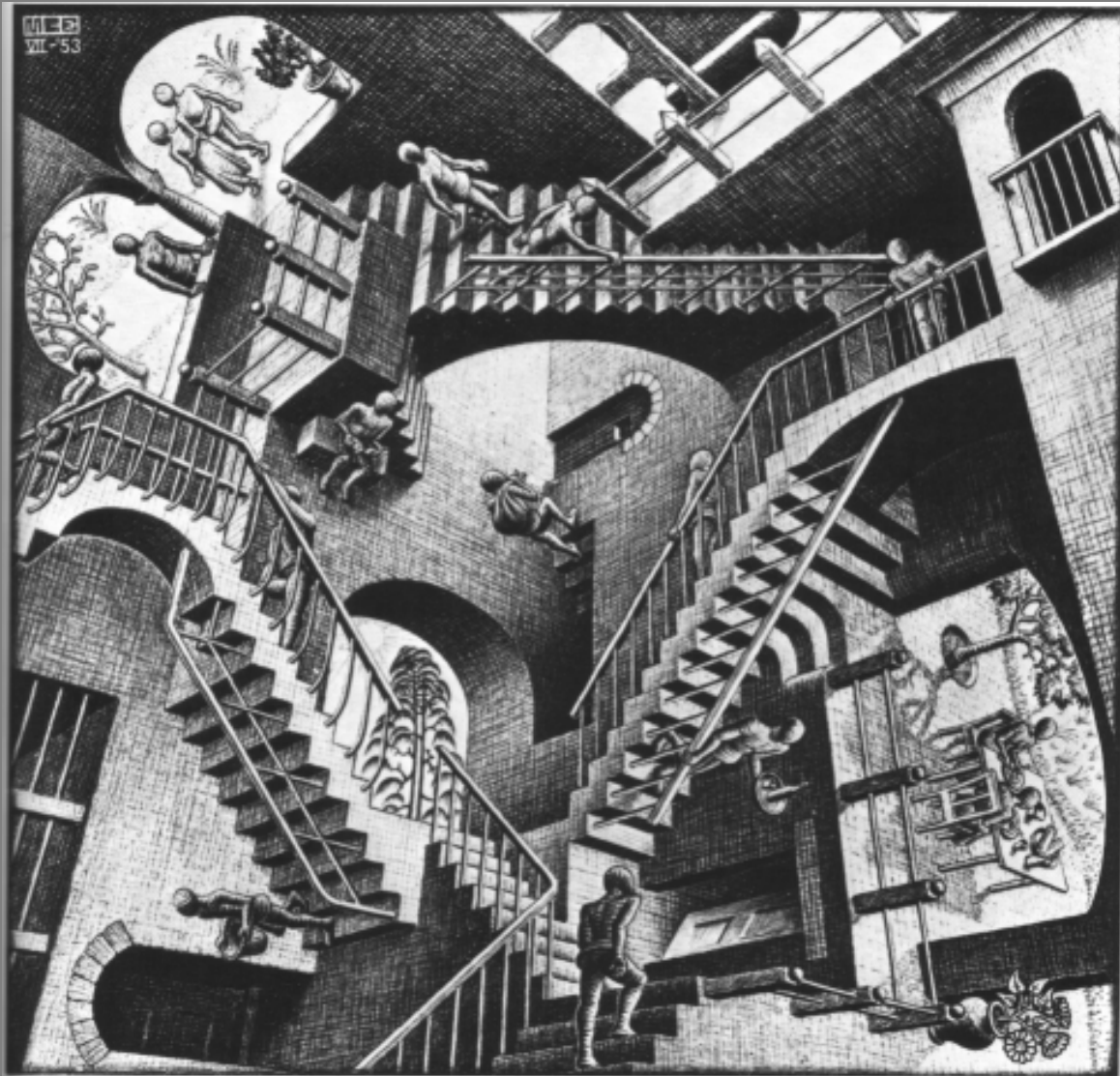


„Konkav und Konvex“; M. C. Escher, Lithographie 1955

Quelle: „Der Zauberspiegel des M. C. Escher“, B. Ernst, Taco



# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen



„Relativität“; M. C. Escher,  
Lithographie 1955

Quelle: „Der Zauberspiegel des  
M. C. Escher“, B. Ernst, Taco

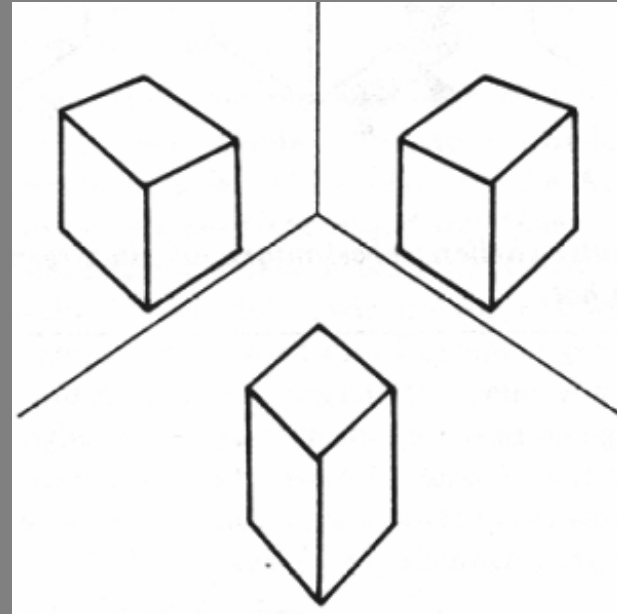


# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

## Zum Ergebnis einer Markierung:

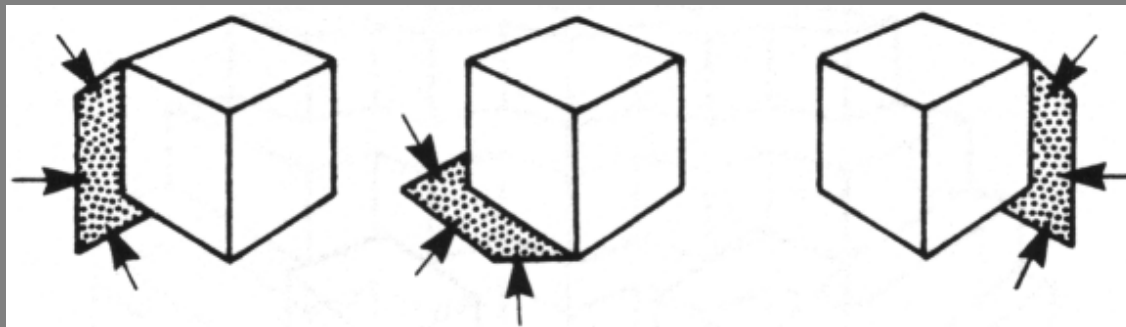
Ergebnis kann noch mehrdeutig sein: ein isoliert gezeichneter Würfel kann an Wand kleben, auf Boden stehen oder frei schweben !

Quelle: „Künstliche Intelligenz“,  
P. H. Winston, Addison Wesley



## Zur Behebung von Mehrdeutigkeiten zusätzliche Möglichkeiten zulassen:

1.) Schattenwurf löst das obige Problem.



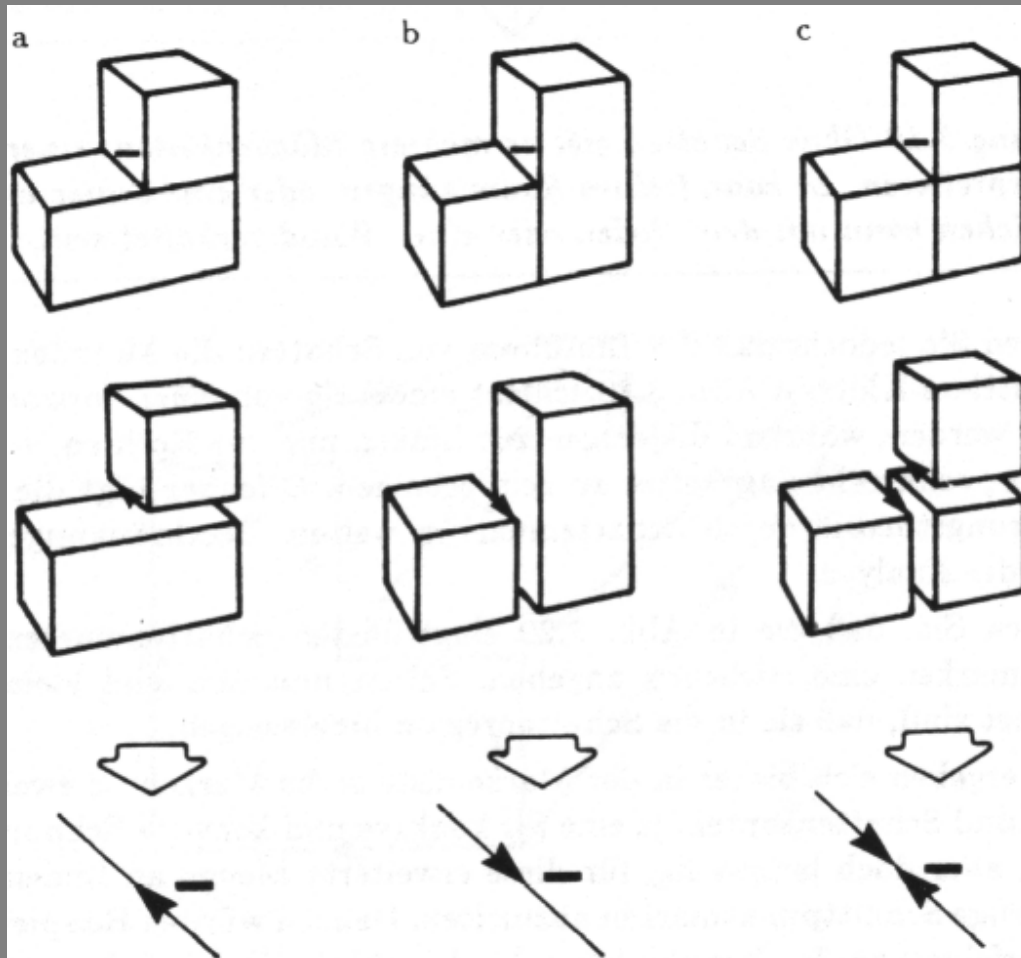
Quelle: „Künstliche Intelligenz“,  
P. H. Winston, Addison Wesley



# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

Fortsetzung: zur Behebung von Mehrdeutigkeiten zusätzliche Möglichkeiten zulassen:

2.) „Spalten“ zulassen:

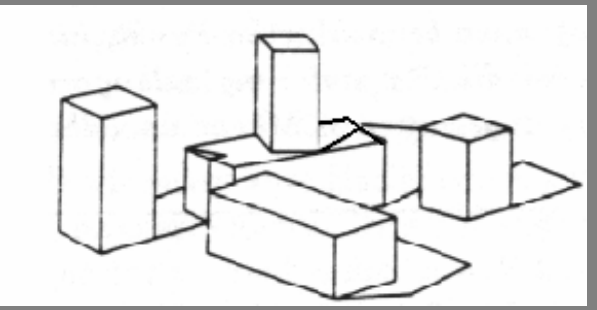
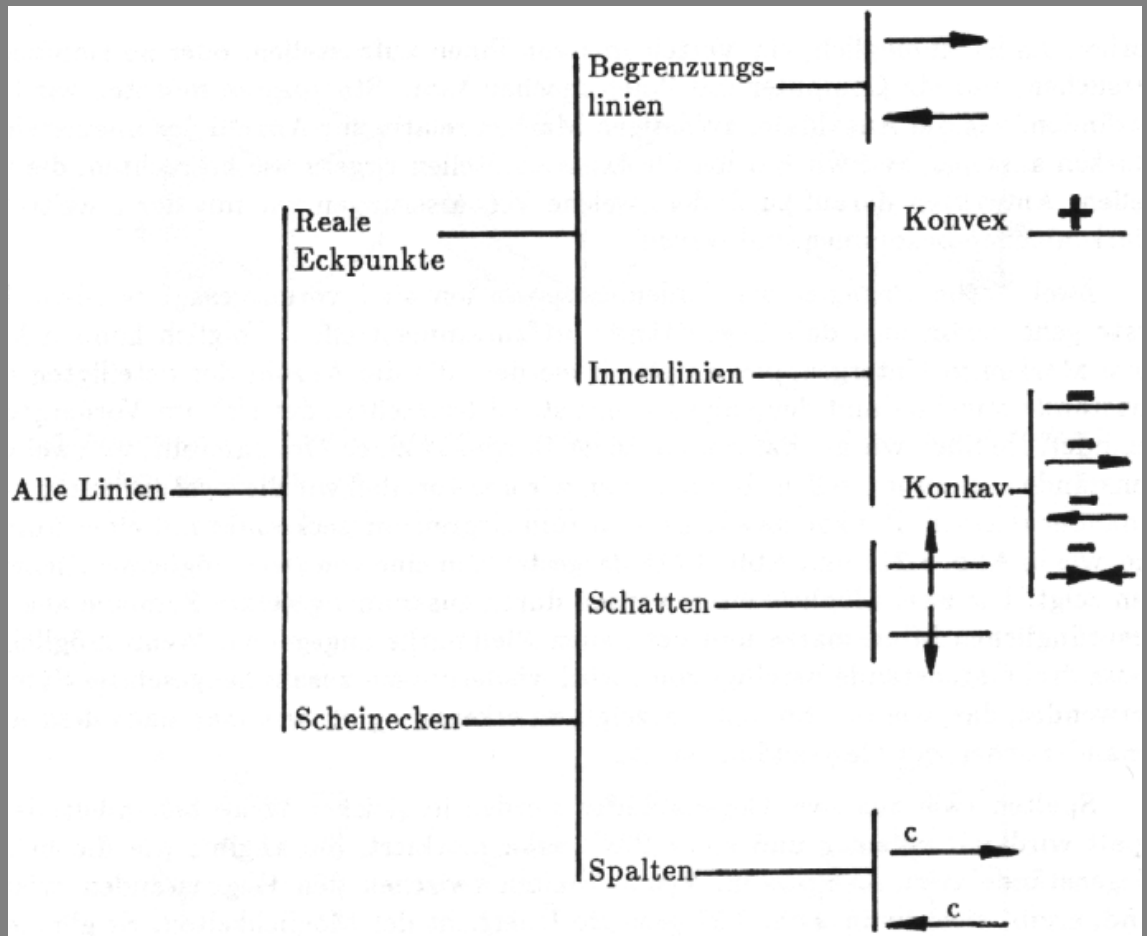


Quelle: „Künstliche Intelligenz“,  
P. H. Winston, Addison Wesley



# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

Fortsetzung: zur Behebung von Mehrdeutigkeiten zusätzliche Möglichkeiten zulassen:  
Klassifizierung von Linien:



Quelle: „Künstliche Intelligenz“, P. H. Winston, Addison Wesley



# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

## Verhältnis zwischen den theoretisch möglichen und den praktisch auftretenden Linien-Schnittpunkts-Markierungen bei den vier einfachen Fällen

<i>Eckpunkt- typ</i>	<i>Anzahl der kombinatorisch mög- lichen Schnittpunkte</i>	<i>Anzahl der physikalisch mög- lichen Schnittpunkte</i>	<i>Verhält- nis (%)</i>
L	16	6	37,5
Gabel	64	<del>8</del> 3 ???	7,8
T	64	4	6,2
Pfeil	64	3	4,7

Quelle: „Künstliche Intelligenz“,  
P. H. Winston, Addison Wesley

## Verhältnis zwischen den theoretisch möglichen und den praktisch auftretenden Linien-Schnittpunkts-Markierungen inkl. Schatten und sonstiger Erweiterungen

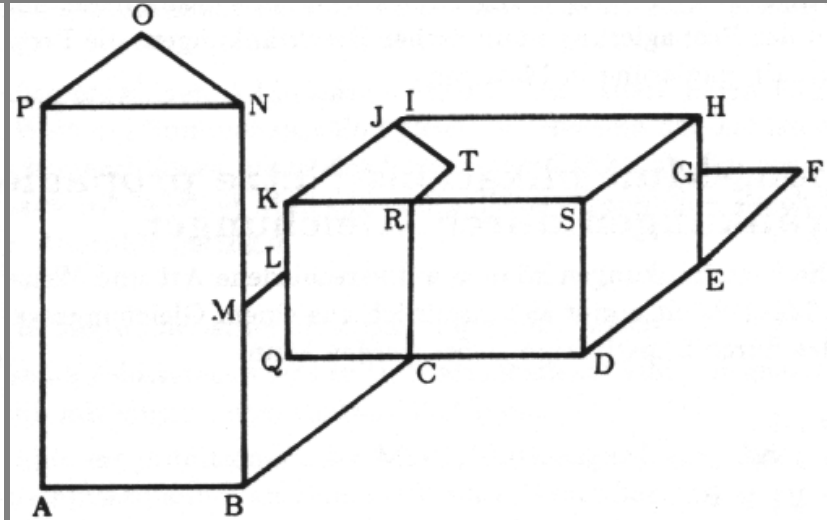
<i>Eckpunkt- typ</i>	<i>Angenäherte Zahl der kombinatorisch möglichen Schnittpunkte</i>	<i>Angenäherte Zahl der physikalisch möglichen Schnittpunkte</i>	<i>Verhält- nis (%)</i>
L	$2,5 \times 10^3$	80	$3,2 \times 10^{-1}$
Gabel	$1,2 \times 10^5$	500	$4,0 \times 10^{-1}$
T	$1,2 \times 10^5$	500	$4,0 \times 10^{-1}$
Pfeil	$1,2 \times 10^5$	70	$5,6 \times 10^{-2}$
Psi	$6,2 \times 10^6$	300	$4,8 \times 10^{-3}$
K	$6,2 \times 10^6$	100	$1,6 \times 10^{-3}$
X	$6,2 \times 10^6$	100	$1,6 \times 10^{-3}$
Mehrfach	$6,2 \times 10^6$	100	$1,6 \times 10^{-3}$
Spitze	$6,2 \times 10^6$	10	$1,6 \times 10^{-4}$
Kk	$3,1 \times 10^8$	30	$9,6 \times 10^{-6}$

Quelle: „Künstliche Intelli-  
genz“, P. H. Winston,  
Addison Wesley

# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

## Protokoll eines Ablaufs des sequentiellen Markierungs-Verfahrens

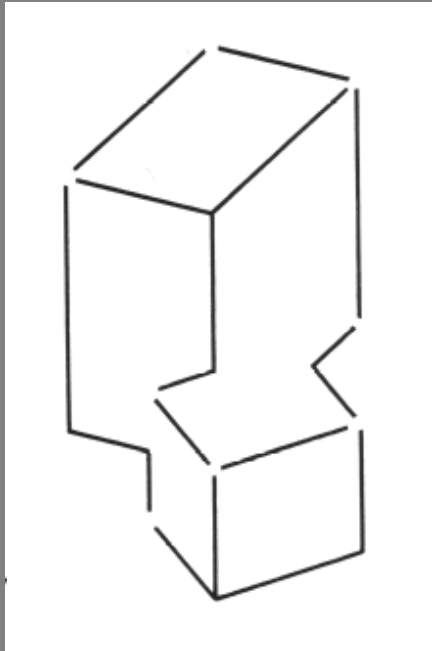
1	A	-->123	28	E	7-> 1	55	N	--> 79
2	A	123-> 76	29	D	6-> 1	56	N	79-> 1
3	B	--> 79	30	F	2-> 1	57	O	--> 123
4	B	79-> 52	31	C	20-> 2	58	O	123-> 2
5	A	76-> 32	32	B	14-> 2	59	P	--> 79
6	C	-->388	33	A	20-> 2	60	P	79-> 5
7	C	388-> 78	34	H	--> 79	61	P	5-> 1
8	B	52-> 34	35	H	79-> 1	62	O	2-> 1
9	A	32-> 26	36	I	-->123	63	Q	--> 123
10	D	--> 79	37	I	123-> 2	64	Q	123-> 5
11	D	79-> 15	38	J	-->593	65	Q	5-> 1
12	C	78-> 20	39	J	593-> 9	66	L	3-> 1
13	B	34-> 14	40	K	--> 79	67	K	5-> 2
14	A	26-> 20	41	K	79-> 7	68	R	--> 388
15	E	--> 79	42	J	9-> 8	69	R	388-> 20
16	E	79-> 33	43	L	-->593	70	R	20-> 4
17	D	15-> 14	44	L	593-> 12	71	J	6-> 4
18	F	-->123	45	K	7-> 5	72	K	2-> 1
19	F	123-> 28	46	J	8-> 6	73	S	-->1391
20	G	-->593	47	I	2-> 1	74	S	1391-> 5
21	G	593-> 42	48	M	-->593	75	S	5-> 1
22	G	42-> 18	49	M	593-> 4	76	T	--> 123
23	F	28-> 11	50	M	4-> 1	77	T	123-> 4
24	E	33-> 7	51	L	12-> 3	78	T	4-> 1
25	D	14-> 6	52	B	2-> 1	79	J	4-> 1
26	F	11-> 2	53	A	2-> 1	80	R	4-> 1
27	G	18-> 1	54	C	2-> 1			



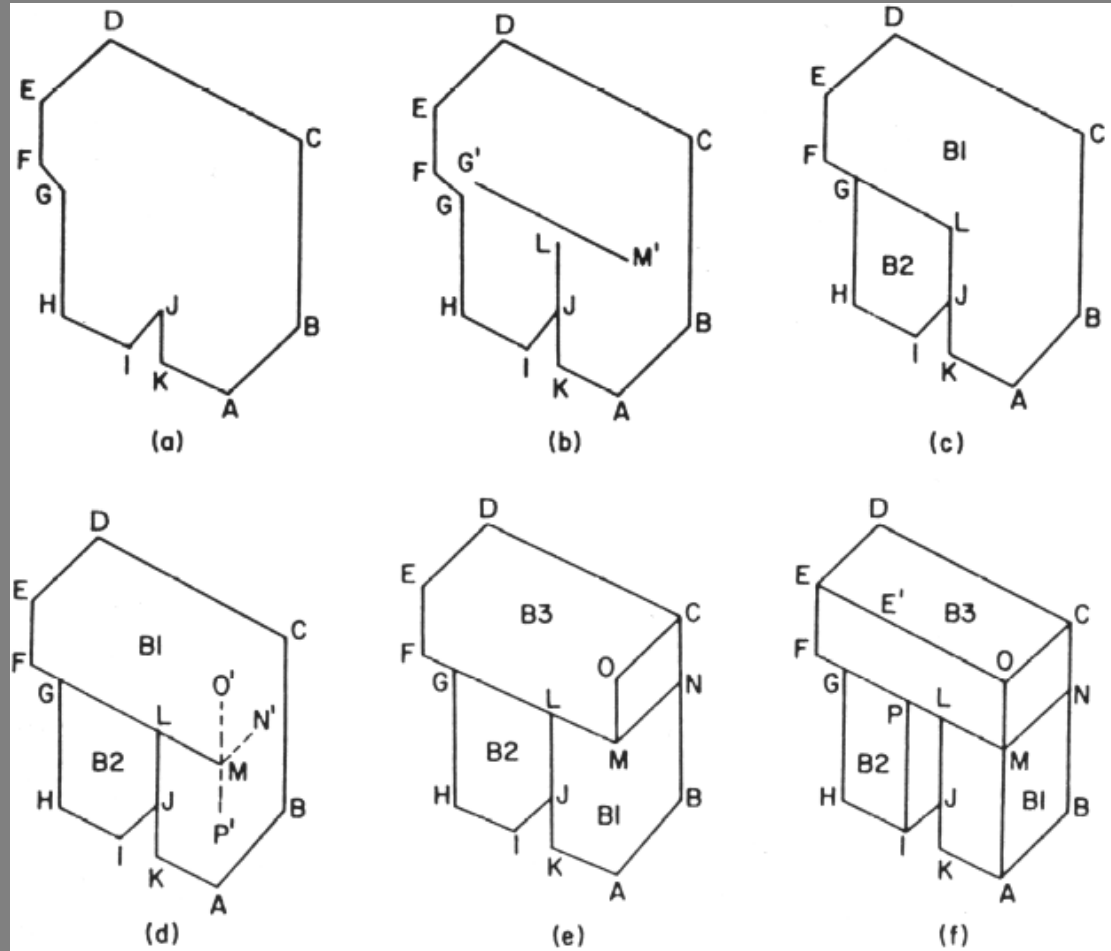
Quelle: „Künstliche Intelligenz“,  
P. H. Winston, Addison Wesley

# Comp. Vis.; Kap. 5: Interpretation von Strichzeichnungen

## Offene Probleme: unvollständige Liniennetze



Quelle: „Three-Dimensional Computer Vision“, Y. Shirai, Springer



Hypothesengesteuerte Linienfindung bei gestörten Strichzeichnungen aus der Klötzchenwelt

Quelle: „Three-Dimensional Computer Vision“, Y. Shirai, Springer