

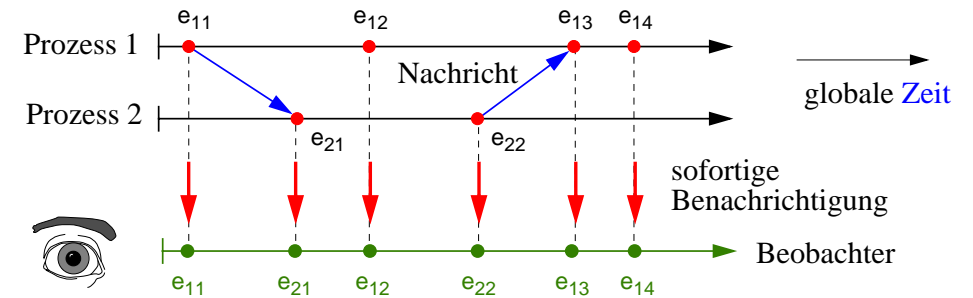
# Paradigma der Beobachtung

- "Korrektes" Beobachten verteilter Systeme ist ein wichtiges praktisches Problem
- Kausaltreue (auch: "kausal konsistente") Beobachtungen stellen das Kernproblem vieler verteilter Algorithmen dar

==> Wie realisiert man kausaltreue Beobachter?

==> Was sind, formal gesehen, *kausaltreue Beobachter / Beobachtungen* ?

# Ideale Beobachtungen

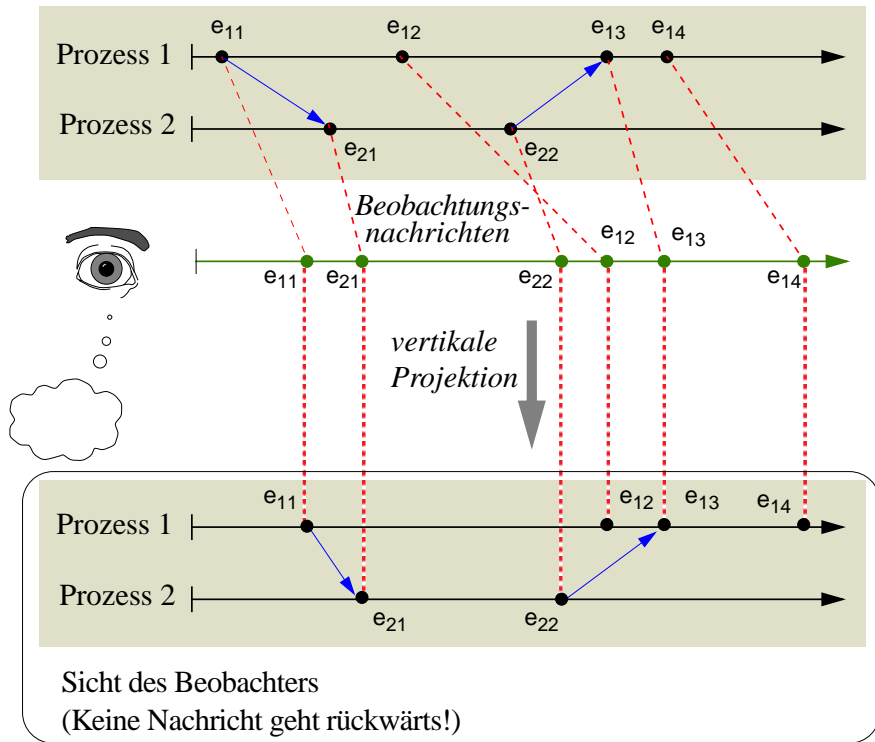


wesentliche Vorkommnisse, z.B. Nachricht empfangen / senden

- Beobachtet werden **Ereignisse** bei den Prozessen
  - Meldung nach aussen über **Beobachtungsnachrichten**
- Eine solche ideale Beobachtung **möchten** wir haben, **können** das aber **nicht** garantiert bekommen
- Statt dessen **könnten** wir etwas bekommen, was wir **nicht** haben **wollen...** (nämlich eine inkonsistente Beobachtung, bei der sich Beobachtungsnachrichten so überholen, dass Ursache und Wirkung vertauscht werden)

# Kausaltreue Beobachtungen

- Ursachen werden stets vor ihren Wirkungen angezeigt
- dies hoffen wir zu bekommen! (aber wie?)



beobachteter globaler Zustand

globaler Zustand  
als vertikale Linie

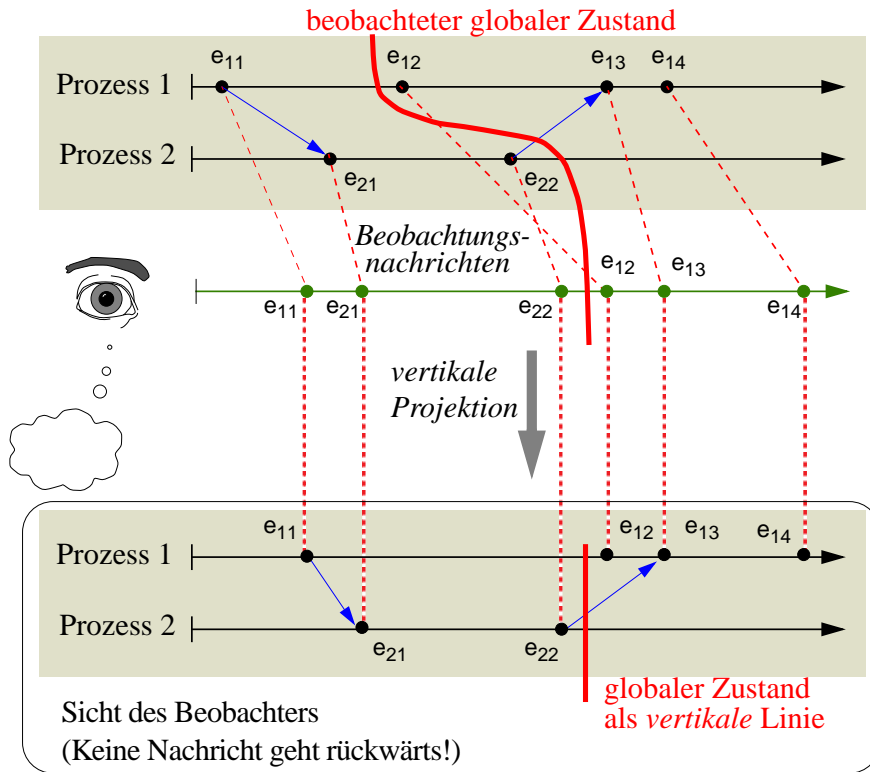
- Beobachtersicht ist nur in irrelevanter Weise verzerrt (d.h. ist eine Gummibandtransformation des echten Ablaufes)

- Beobachteter globaler Zustand ist daher möglich

- gültige, nicht zu widerlegende Interpretation  
- nicht entscheidbar, ob tatsächlich eingetreten

# Kausaltreue Beobachtungen

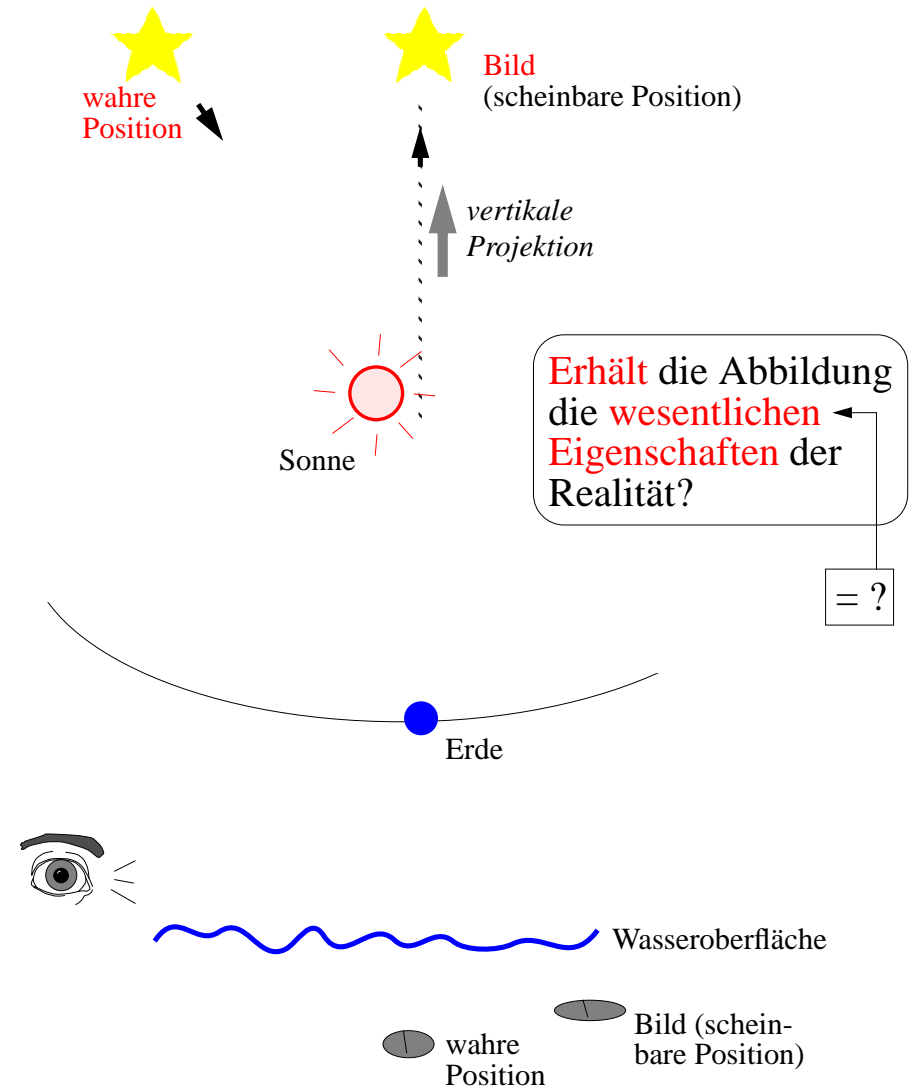
- Ursachen werden stets vor ihren Wirkungen angezeigt
- dies hoffen wir zu bekommen! (aber wie?)



- Beobachtersicht ist nur in irrelevanter Weise verzerrt (d.h. ist eine Gummibandtransformation des echten Ablaufes)
- Beobachteter globaler Zustand ist daher möglich

- gültige, nicht zu widerlegende Interpretation  
- nicht entscheidbar, ob tatsächlich eingetreten

# Bild, Schein und Wirklichkeit

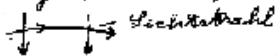


- Offenbar kann man mit einem gegenüber der Realität "etwas" verzerrten Bild ganz gut leben...

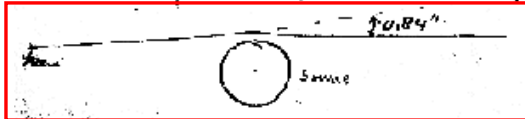
Zürich, 14. I. 13.

Hoch geehrter Herr Kollege!

Eine einfache theoretische Überlegung macht die Annahme plausibel, dass Lichtstrahlen in einem Gravitationsfelde eine Deviation erfahren.



Aus Sonnenrande müsste diese Ablenkung  $0,84''$  betragen und wie  $\frac{1}{R}$  abnehmen (R = Entfernung vom Sonnenmittelpunkt).



Es wäre deshalb von grösstem Interesse, bis zu wie grosser Sonnenhöhe gewisse Fixsterne bei Anwendung der stärksten Vergrösserungen bei Tage (ohne Sonnenfinsternis) gesehen werden können.

Auf den Rat meines Kollegen, d. Herrn Prof. Maurer bitte ich Sie deshalb, mir mitzutheilen, was Sie nach Ihrer reichen Erfahrung in diesen Dingen für mit den heutigen Mitteln erreichbar halten.

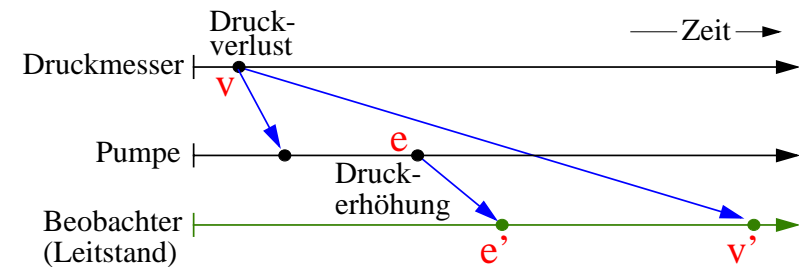
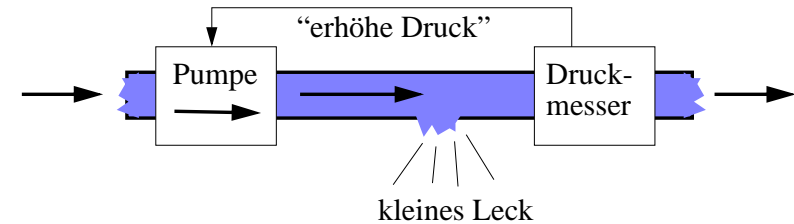
Mit aller Hochachtung  
Ihr ganz ergebener

A. Einstein  
Technische Hochschule  
Zürich.

Brief an George Hale,  
Mount Wilson  
Observatory, Pasadena

# Kausal (in)konsistente Beobachtungen

wie früher schon erwähnt...:



## Falsche Schlussfolgerung des Beobachters:

Es erhöhte sich der Druck (aufgrund einer unbegründeten Aktivität der Pumpe), es kam zu einem Leck, was durch den abfallenden Druck angezeigt wird.

Forderung ("kausaltreue Beobachtung"):

Ursache stets vor (u.U. indirekter) Wirkung beobachten!

Frage:

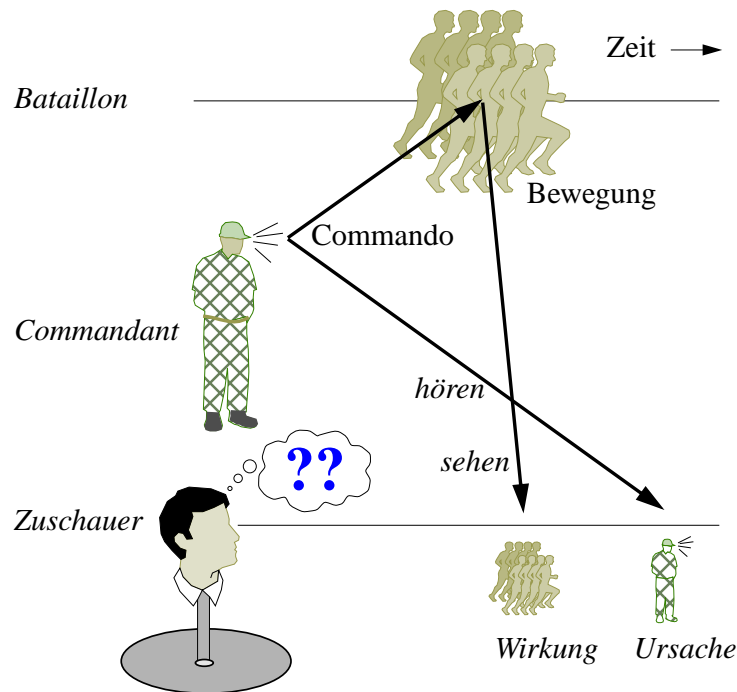
Wie implementiert man kausal konsistente Beobachter?

# Kausal (in)konsistente Beobachtungen

Das Beobachtungsproblem ist nicht neu...

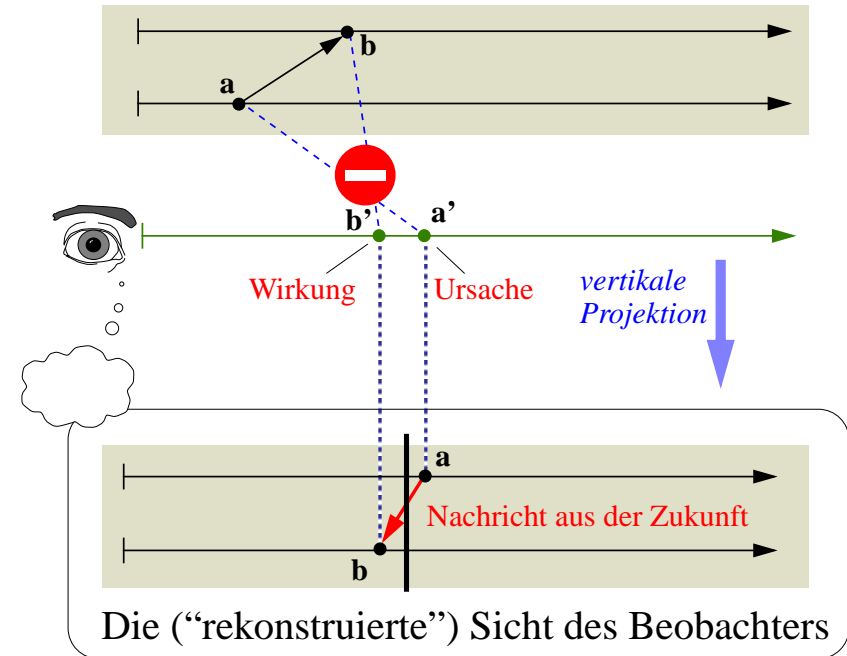
Wenn ein Zuschauer von der Ferne das Exerzieren eines Bataillons verfolgt, so **sieht** er übereinstimmende Bewegungen desselben plötzlich eintreten, **ehe** er die Commandostimme oder das Hornsignal **hört**; aber aus seiner Kenntnis der **Causalzusammenhänge** weiss er, dass die Bewegungen die **Wirkung** des gehörten Commandos sind, dieses also jenen **objectiv** vorangehen muss, und er wird sich sofort der Täuschung bewusst, die in der **Umkehrung der Zeitfolge in seinen Perceptionen** liegt.

Christoph von Sigwart (1830-1904) *Logik* (1889)



# Kausal inkonsistente Beobachtungen

- Überholungen von Benachrichtigungen:



- In der Interpretation des Beobachters:

- Nachricht fließt **rückwärts** in der Zeit
- **Kausalität ist verletzt** (**Wirkung** vor **Ursache**!)
- Beobachteter globaler Zustand nach b ist **inkonsistent**

- Wir hätten gerne eine **kausaltraue Beobachtung**, wo die Beobachtersicht nur in irrelevanter Weise verzerrt ist

- d.h. eine **Gummibandtransformation** des echten Ablaufes ist (bei der keine Nachricht rückwärts verläuft)
- wie **erzwingt** man das?

# Kausaltreue Beobachtungen

*Definition:*

lineare Erweiterung oder Einbettung

Eine *kausaltreue Beobachtung* einer Berechnung ist eine Linearisierung der entsprechenden (partiellen) Kausalordnung  $(E, <)$

Mit anderen Worten:

Jeder "Trace" von Ereignissen, in dem eine Wirkung niemals vor ihrer Ursache erscheint, heisst "kausaltreue Beobachtung"

*Bemerkung:*

Es gibt i.a. viele unterschiedliche Linearisierungen!

- wieviele? (Größenordnung in Abhängigkeit der Ereignis- und Prozesszahl?)
- eine sequentielle Berechnung besitzt offenbar nur eine einzige Linearisierung

- kausal unabhängige Ereignisse können stets in unterschiedlicher Reihenfolge wahrgenommen werden
- alle kausaltreuen Beobachtungen sind gleichermassen "wahr"
- alle kausaltreuen Beobachter sind sich bzgl. Kausalitätsrelation einig!

Schnitt aller Linearisierungen einer Halbordnung = Halbordnung  
(Theorem von Szpilrajn, 1930)

==> der "unstrittige Kern" aller Beobachter ist die Kausalrelation der Berechnung selbst!

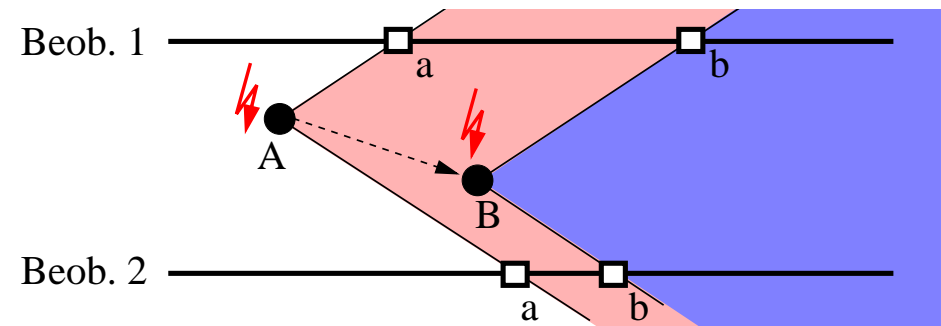
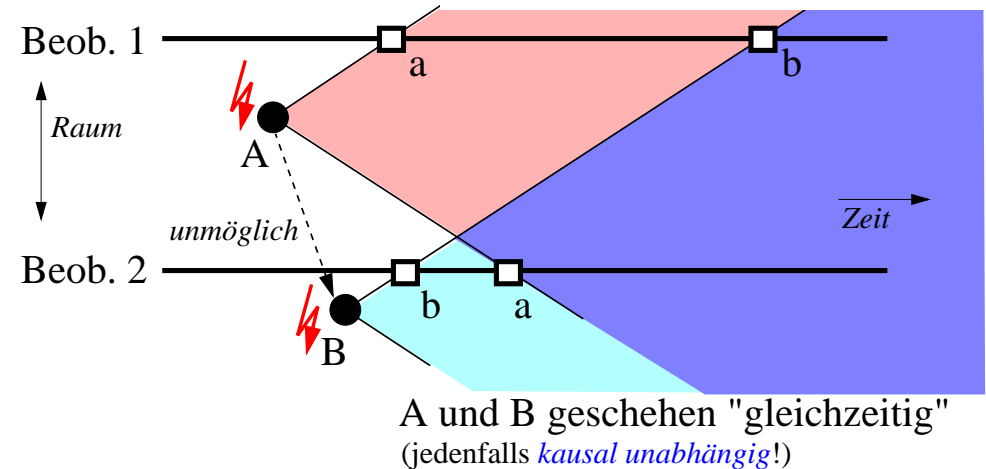
==> in den "wesentlichen" Aspekten stimmen alle Beobachter überein!  
(die Kausalbeziehung ist also ein beobachterinvariantes, objektives Faktum)

==> vert. Berechnung ist durch die Menge aller ihrer Beobachtungen charakterisiert

# Relativierung der Gleichzeitigkeit

Zwei "kausal unabhängige" Ereigniss können in beliebiger Reihenfolge beobachtet werden!

*Lichtkegel-Prinzip* der relativistischen Physik

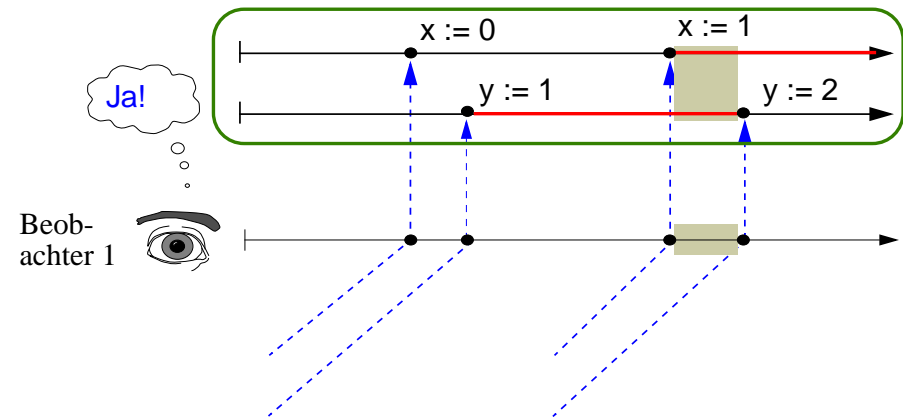
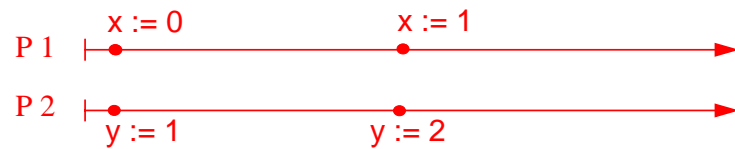


beobachterinvariant  
==> *objektive Tatsache*

B liegt im Kegel von A -->  
B hängt kausal ab von A -->  
*Alle Beobachter sehen B nach A*

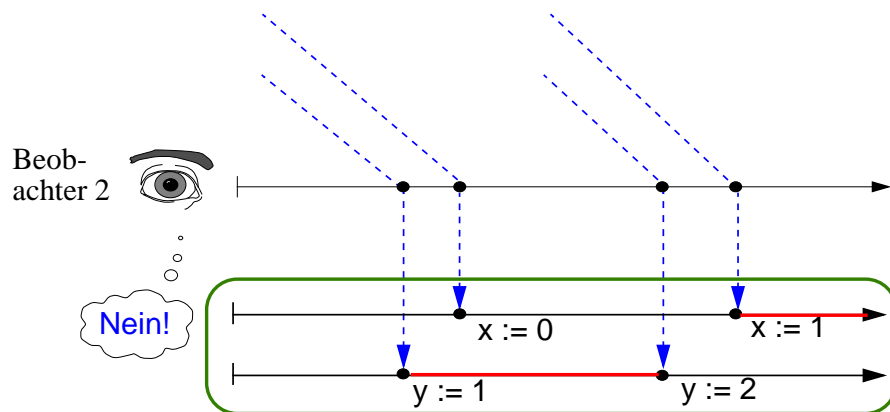
# Das "Entdecken" globaler Prädikate

Frage: Gilt in dieser Berechnung  $\Phi \equiv (x = y)$  ?



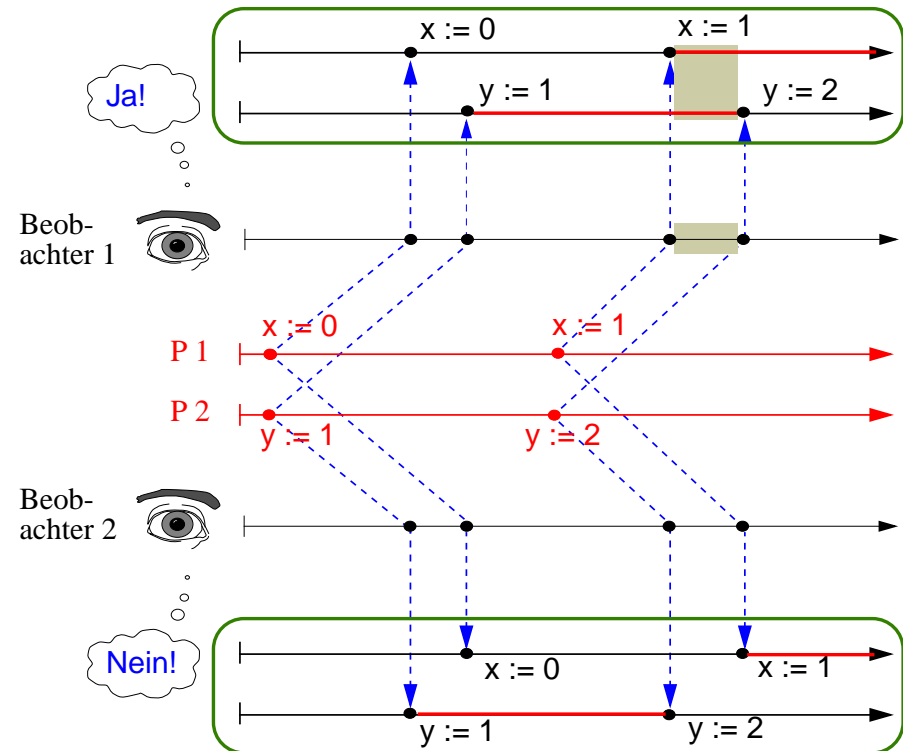
# Das "Entdecken" globaler Prädikate

Frage: Gilt in dieser Berechnung  $\Phi \equiv (x = y)$  ?



- Meldungen alle gleich schnell
- Beide Beobachtungen sind gleich "richtig"
- Die Beobachter stimmen bzgl.  $x = y$  nicht überein!

Aber was denn nun: *gilt  $x=y$  in dieser Berechnung oder nicht?*



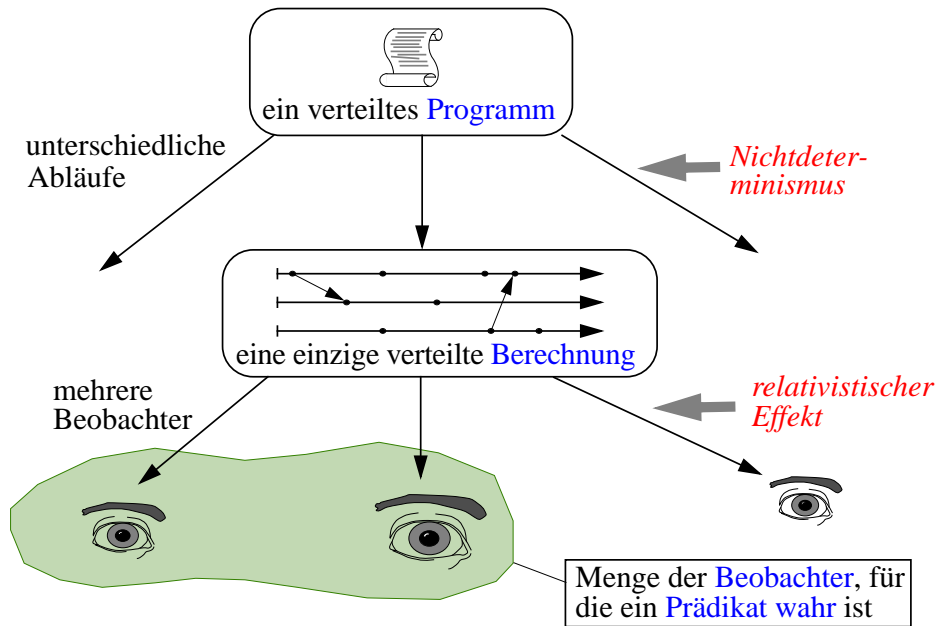
- Meldungen sind alle gleich schnell
- Beide (kausaltreuen!) Beobachtungen sind gleich "richtig"
- Die Beobachter stimmen bzgl.  $x = y$  nicht überein!

Aber was denn nun: *gilt  $x=y$  in dieser Berechnung oder nicht?*



# “Possible Worlds”

- Verschiedene Beobachter sehen *verschiedene Wirklichkeiten*
- > Frage, ob ein bestimmtes Prädikat gilt, ist u.U. **sinnlos!**

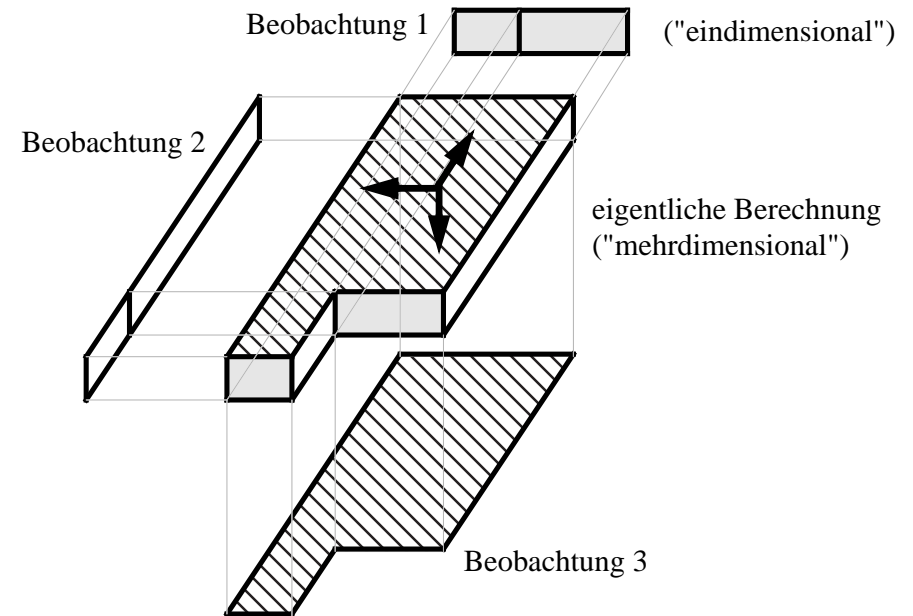


## Konsequenz:

Es ist naiv (d.h. falsch!), einen **verteilten Debugger** zu entwickeln, mit dem man solche (im sequentiellen Fall “richtigen”) Fragen beantworten kann!

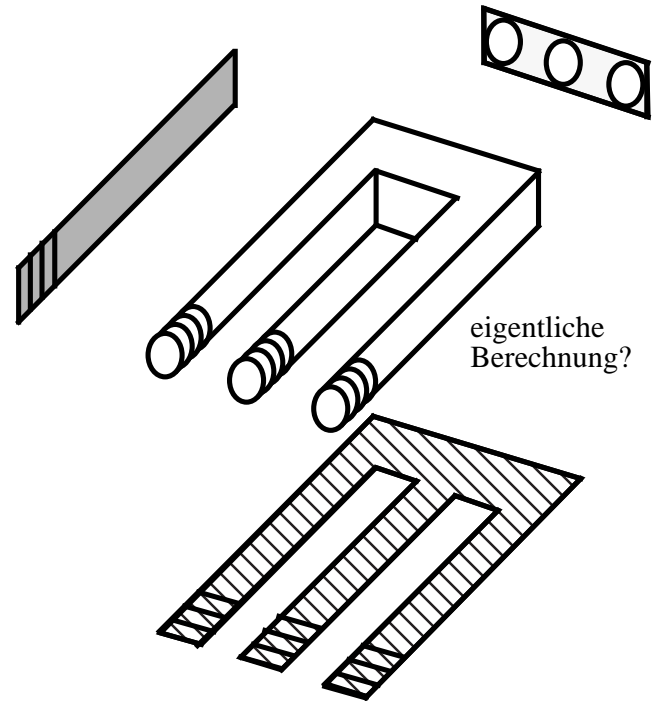
- im sequentiellen Fall: Berechnung = Beobachtung
- im verteilten Fall aber: Berechnung  $\neq$  Beobachtung
- **Gültigkeit von Prädikaten ist eine Eigenschaft einer Beobachtung, nicht einer Berechnung!**
- gibt es sinnvolle **beobachterinvariante Prädikate**?

# Beobachtung, Bild und Wirklichkeit



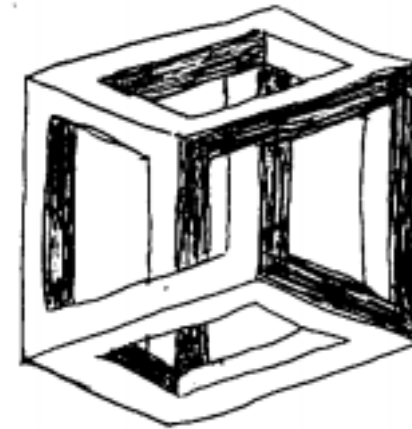
- Einige Eigenschaften gehen durch die Abbildung verloren
  - hier: kausale Unabhängigkeit
- Essentielle Eigenschaften sollen erhalten bleiben
  - hier: kausale Abhängigkeit
- Lässt sich die eigentliche Berechnung aus allen Beobachtungen rekonstruieren?
  - ja: Schnitt aller Linearisierungen ist Halbordnung selbst

## Wirklichkeit ?

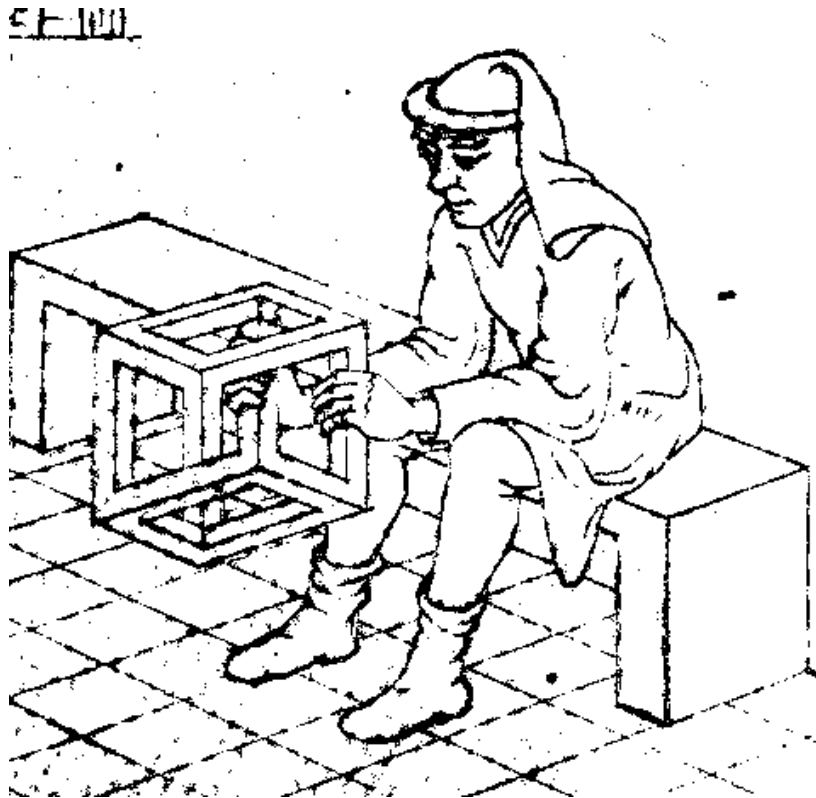


- Sind die verschiedenen Beobachtungen “verträglich”?
- Die beobachtete Wirklichkeit kann weitaus merkwürdiger sein, als eine Beobachtung vermuten lässt!
- Lassen sich die verschiedenen Beobachtungen zu einem konsistenten Bild zusammenfügen?

## Ein inkonsistentes Bild



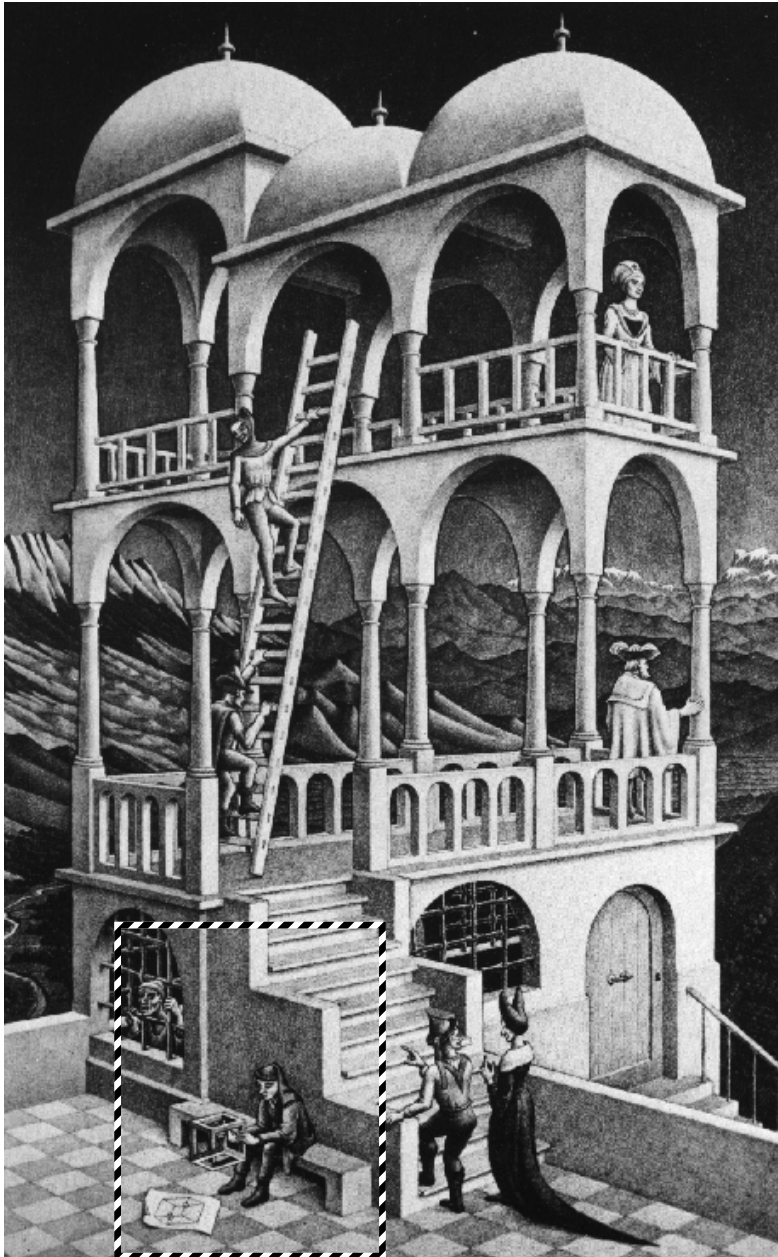
# Wie heisst der Künstler?



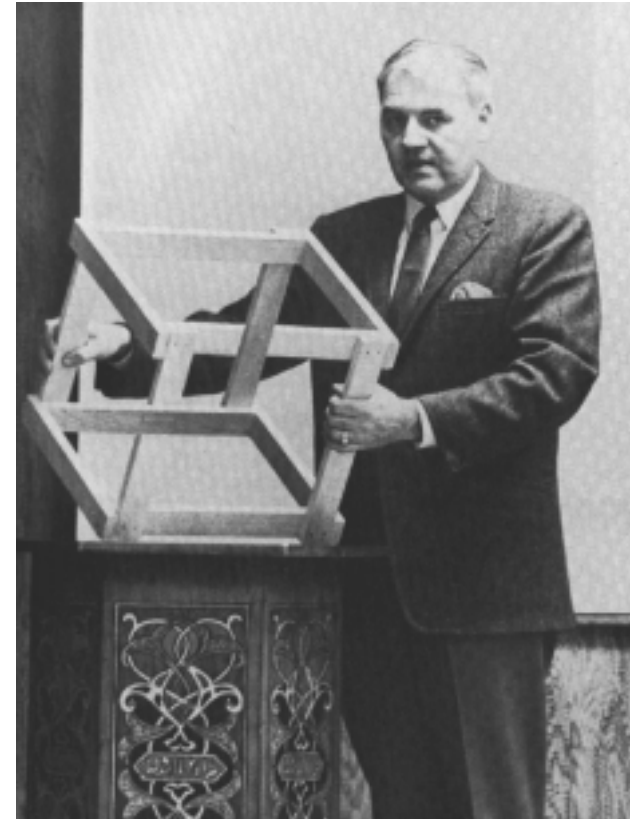
# Wie heisst der Künstler?



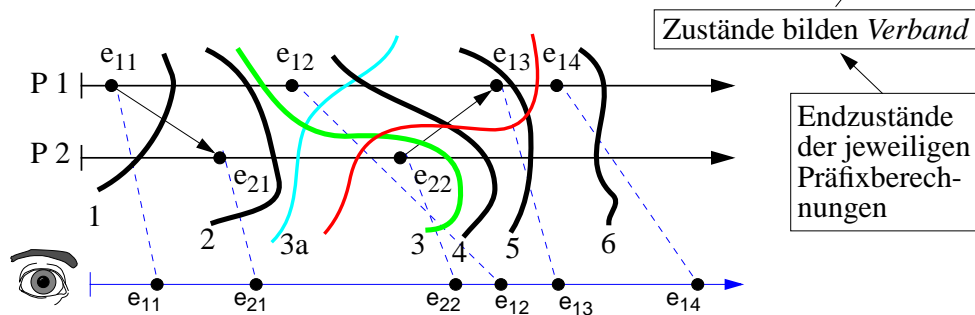
## M.C. Escher: Belvedere (1958)



## Ein Schnappschuss als Beweis

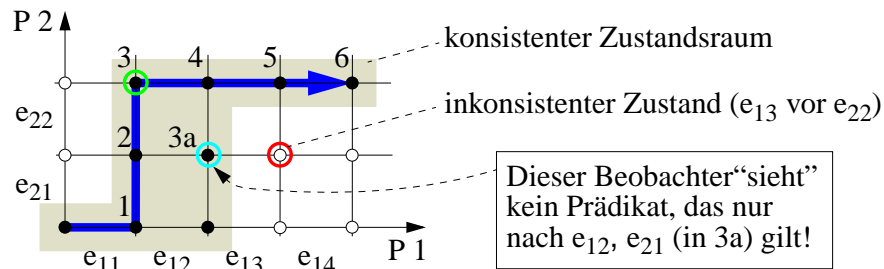


# Das n-dimensionale Zustandsgitter



- **Beobachtung** =

- Lineare Folge von Ereignissen
- Folge damit assoziierter globaler Zustände



- **Beobachtung** = Pfad von links unten nach rechts oben  
(kausaltrue Beobachtung, wenn dieser sich nur im "erlaubten" Bereich aufhält)

- Ein Beobachter sieht **alle Ereignisse**, aber nur eine **Teilmenge** aller möglichen **Zustände**!

--> Beobachter kann Prädikate übersehen!

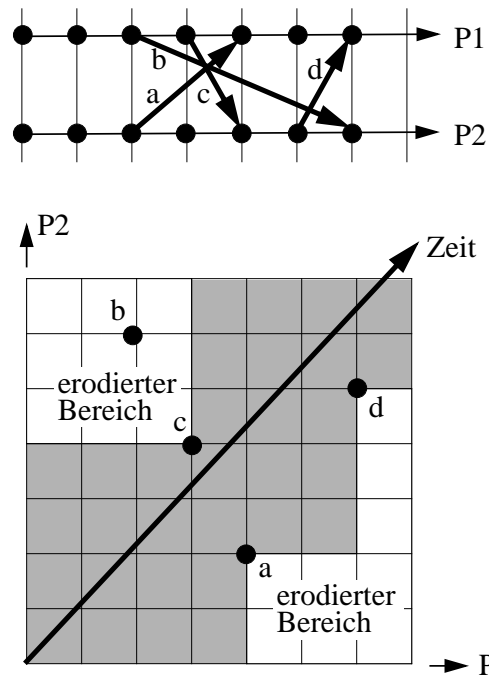
- Mit einem Schnappschussalgorithmus kann nur eine **einzig** (i.a. **lückenhafte**) von vielen Beobachtungen erlangt werden

# Fragen zum Beobachtungsbegriff

- 1) Gibt es zu jedem kons. Zustand  $s$  einer Berechnung (mind.) einen Beobachter, der diesen "wahrnimmt"?
- 2) Seien  $s, s'$  zwei bel. (kons.) Zustände. Gibt es immer eine Beobachtung  $Obs$  mit  $s \in Obs$  und  $s' \in Obs$ ?
- 3) Können zwei konkurrente Zustände  $s, s'$  (d.h. weder  $s < s'$  noch  $s' < s$ ) in der selben Beobachtung auftauchen?  
(Ordnungsrelation entspr. Verband bzw. Präfixberechnung)
- 4) Es sei  $s \in Obs$  und  $s$  später als  $s'$ . Ist dann  $s' \in Obs$ ?
- 5) Sei  $s \notin Obs$ . Gibt es stets ein  $s' \in Obs$ , welches später als  $s$  ist? ... früher als  $s$  ist?
- 6) In einer Beobachtung  $Obs = s_1, \dots, s_k$  sei  $s_i \in Obs$  und  $e \in s_i$  (Zustand aufgefasst als Menge der bis dahin vergangenen Ereignisse)
  - a) Gilt dann  $e \in s_j$  für alle  $s_j \in Obs$  mit  $j > i$ ? Interpretation?
  - b) Es sei  $e' < e$ . Gilt dann  $e' \in s_i$ ?
- 7) Sind alle Beobachtungen der selben (endlichen) Berechnung gleich lang?

# Der erodierte Zustandshyperwürfel

- Hier: zwei Prozesse --> 2-dimensionaler Würfel



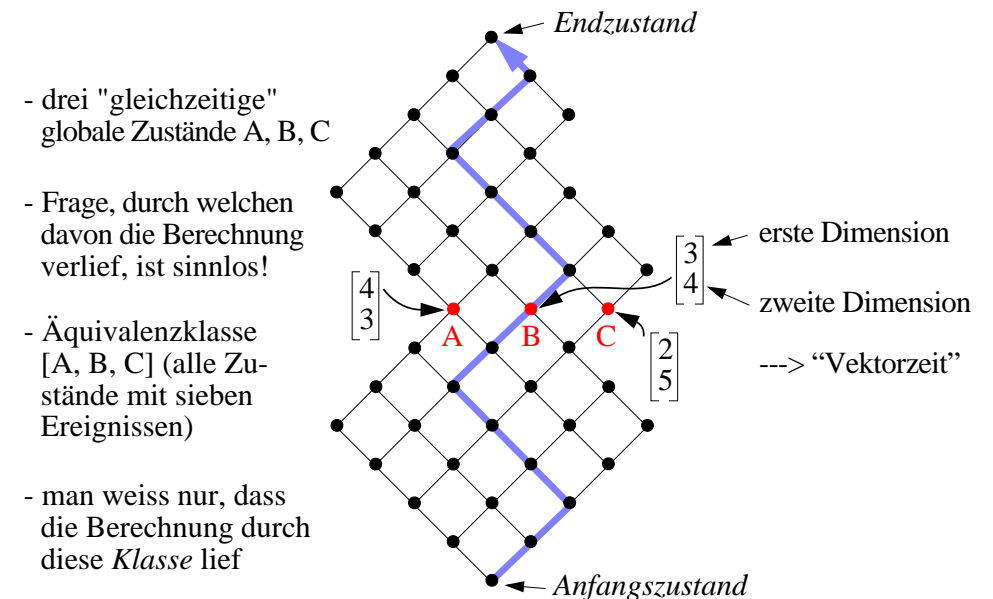
- "Erosion" der inkonsistenten Zustände von den Ecken her

- keine Nachricht wird empfangen, bevor sie gesendet wurde
- ein Prozess blockiert in einer Empfangsanweisung, bis eine Nachricht verfügbar ist (und das zugehörige send somit ausgeführt wurde)
- Nachrichten zur Synchronisation: sorgen dafür, dass kein Prozess sich zu schnell entfernt (zwingen Prozesse in den "Schlauch" von links unten nach rechts oben)

# Der Verband konsistenter Zustände

- Zu jeder Präfixberechnung gehört ein konsistenter Zustand.

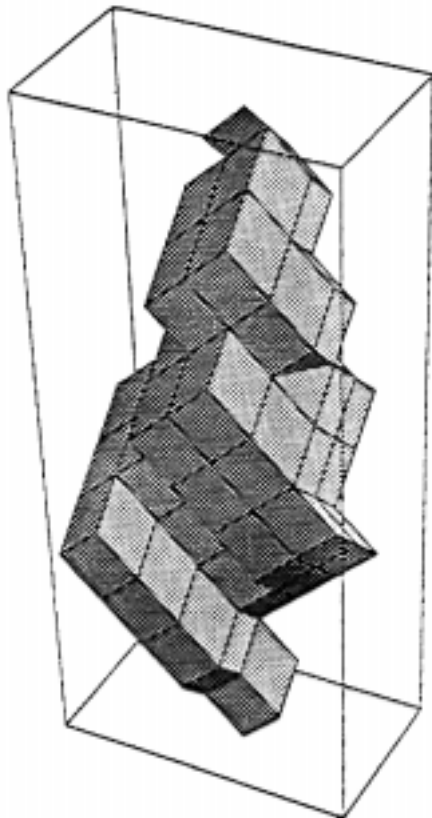
- Die "echte" Folge globaler Zustände ist ein Pfad durch den Verband (ist aber unbekannt, wenn keine exakte globale Zeit existiert).



- Konsistente Zustände bilden einen Verband

- früherer, späterer globaler Zustand; abgeschlossen bzgl. "sup" und "inf"
- visualisiert als eine kompakte Menge (ohne "Löcher")
- Unterverband des Verbandes *aller* globalen Zustände

# Eine 3-fach verteilte Berechnung



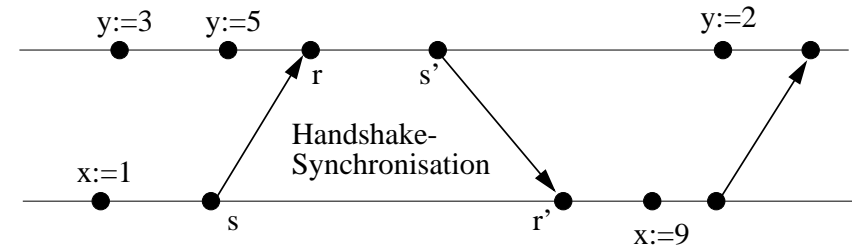
[Claude Jard et al., Rennes, Frankreich]

- 3-dimensionales Gebilde (als "kompakte Menge")
- Synchronisation --> "Kante" oder "Kerbe" auf der Oberfläche
- "Engpässe" werden so sichtbar!

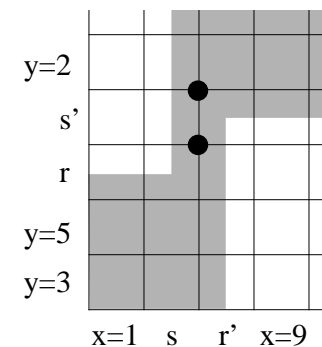
Kann man auch noch Berechnungen mit mehr Prozessen so visualisieren?

# Synchronisationsengpässe

- Hier sieht *jeder* kausaltreue Beobachter "kurzzeitig"  $y=5, x=1$ :



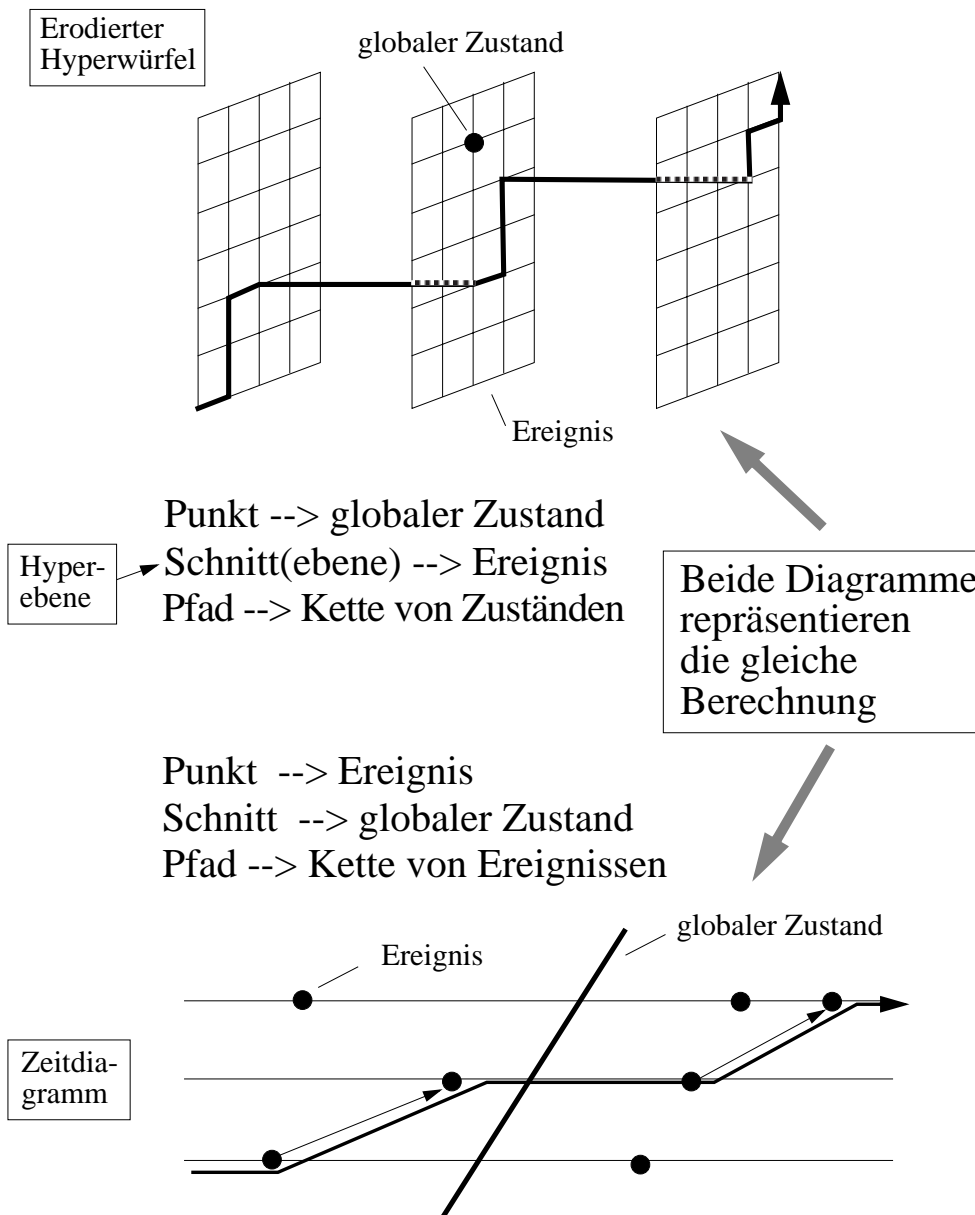
- Der Zustand  $y=5, x=1$  wird also auf alle Fälle angenommen; er ist daher "unvermeidlich"
- Verallgemeinerung: "Barrier Synchronisation" (erst wenn alle Prozesse die Barriere erreicht haben, dürfen sie weiterlaufen)



Durch die beiden markierten Zustände muss jeder Beobachter; dort gilt jedoch  $x=1, y=5$

==> Mass für die Parallelität bzw. Unabhängigkeit?  
(ein gutes numerisches Mass für "Parallelität" zu finden ist schwierig!)

# Dualismus der Diagramme



# Konsequenzen

- Prädikate gelten i.a. nur relativ zu Beobachtern, nicht für eine Berechnung als solche!
  - Debugging: Nächster Schritt / Zustand nicht eindeutig
  - Debugging: "stop when <condition>" i.a. sinnlos
  - Polynomielle Zahl von Zuständen
  - Exponentielle Zahl von Beobachtungen
- i.a. ziemlich hoffnungslos!
- Ein einzelner Beobachter kann einen Zustand, in dem ein Prädikat gilt, "verpassen"

Genauere Spezifikation von Gültigkeit notwendig, z.B.:

- Prädikat  $\Phi$  ist *aus Sicht von Beobachter X* erfüllt
- Prädikat  $\Phi$  wird *von wenigstens einem* Beobachter wahrgenommen
- Prädikat  $\Phi$  wird *von allen* Beobachtern wahrgenommen