Paradigma der Beobachtung

- “Korrektes” Beobachten verteilter Systeme ist ein wichtiges praktisches Problem

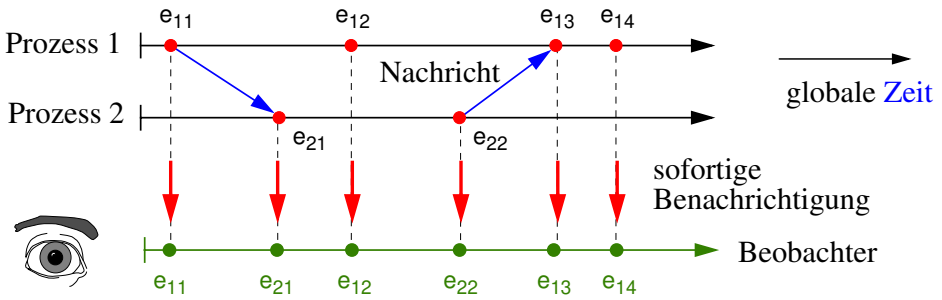
- Kausaltreue (auch: "kausal konsistente") Beobachtungen stellen das Kernproblem vieler verteilter Algorithmen dar

---

==> Wie realisiert man kausaltreue Beobachter?

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

Ideale Beobachtungen



wesentliche Vorkommnisse, z.B. Nachricht empfangen / senden

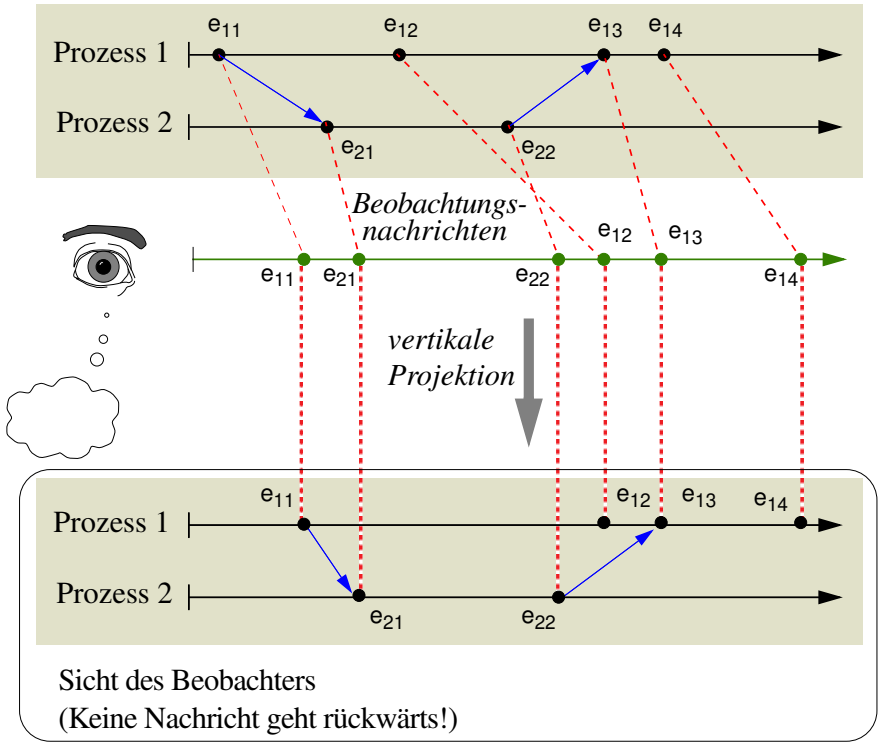
- Beobachtet werden Ereignisse bei den Prozessen
  - Meldung nach aussen über Beobachtungsnachrichten

- Eine solche ideale Beobachtung möchten wir haben, können das aber nicht garantiert bekommen

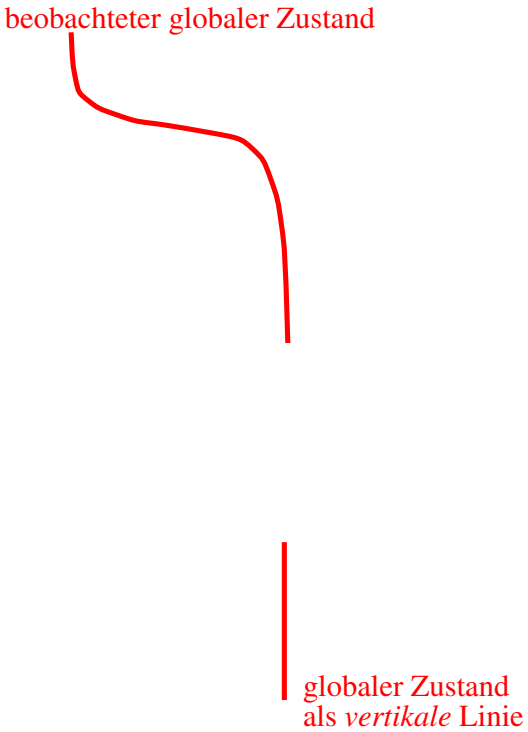
- Statt dessen könnten wir etwas bekommen, was wir nicht haben wollen...
  (nämlich eine inkonsistente Beobachtung, bei der sich Beobachtungs-nachrichten so überholen, dass Ursache und Wirkung vertauscht werden)

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)

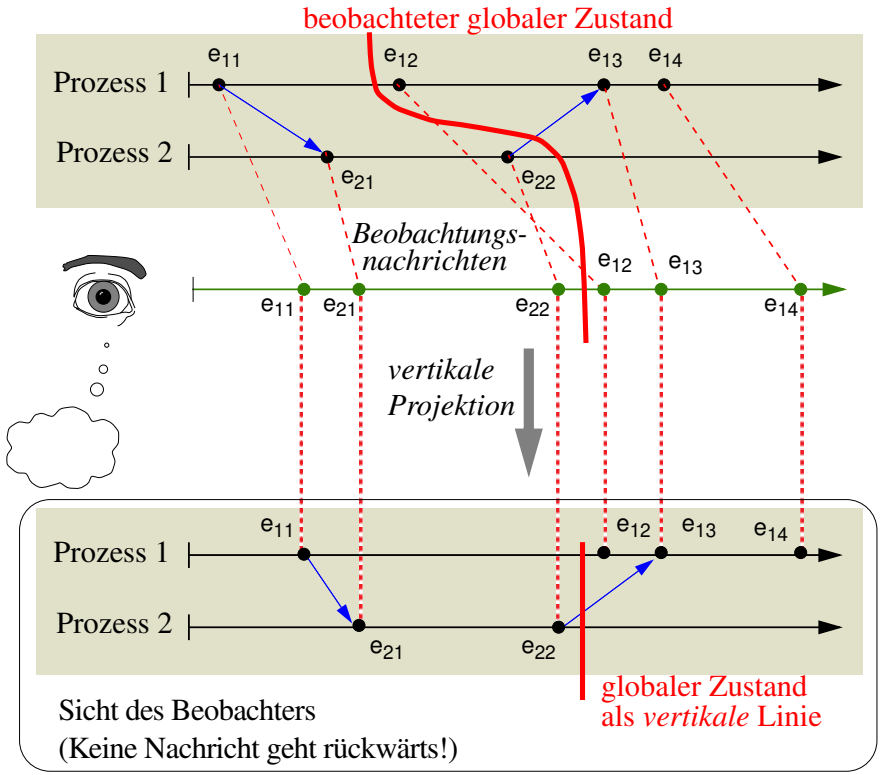


- Beobachteter globaler Zustand ist daher *möglich*

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

Kausaltreue Beobachtungen

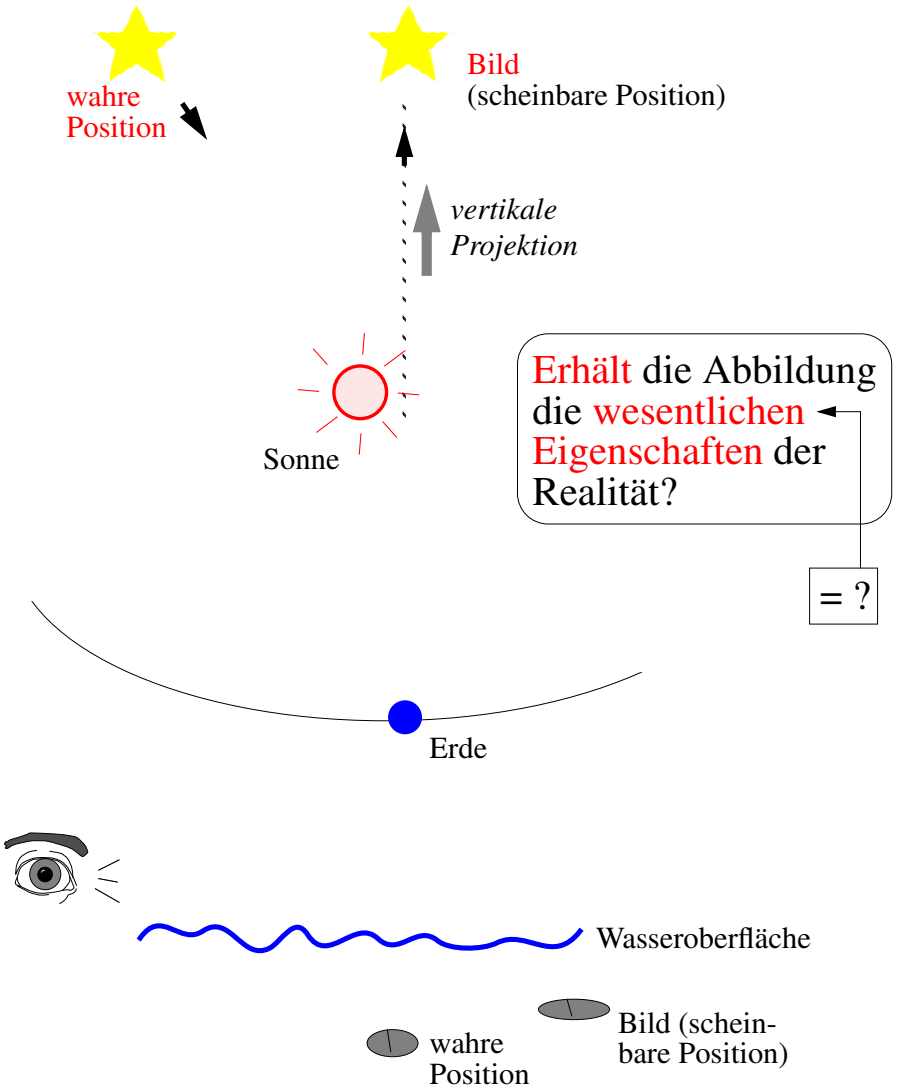
- Ursachen werden stets vor ihren Wirkungen angezeigt
  - dies hoffen wir zu bekommen! (aber wie?)



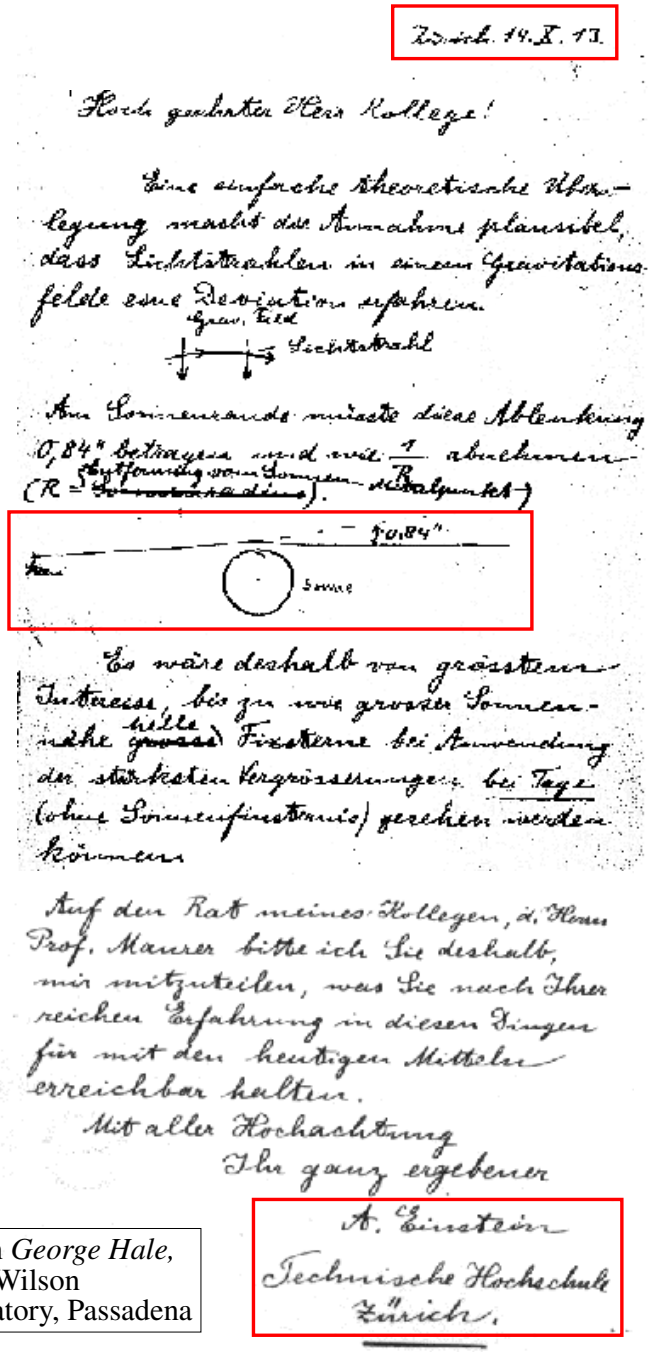
- Beobachtersicht ist nur in irrelevanter Weise verzerrt
  (d.h. ist eine Gummibandtransformation des echten Ablaufes)
- Beobachteter globaler Zustand ist daher *möglich*

  - *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. X. 13.

Hochgeehrter Herr Kollege!

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

Grav. Feld — Lichtstrahl

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

0,84" — Sonne

Es wäre deshalb von grösstem Interesse, bis zu wie grosser Sonnenhelle 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 mitzuteilen, was Sie nach Ihrer reichen Erfahrung in diesen Dingen für mit den heutigen Mitteln erreichbar halten.

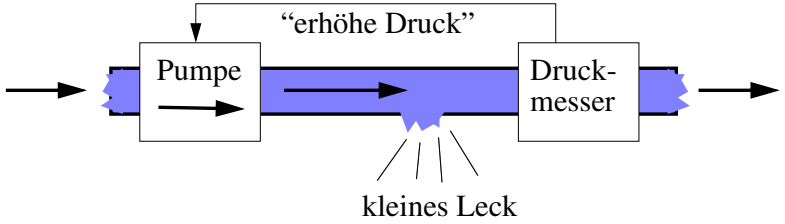
Mit aller Hochachtung
Ihr ganz ergebener
A. Einstein

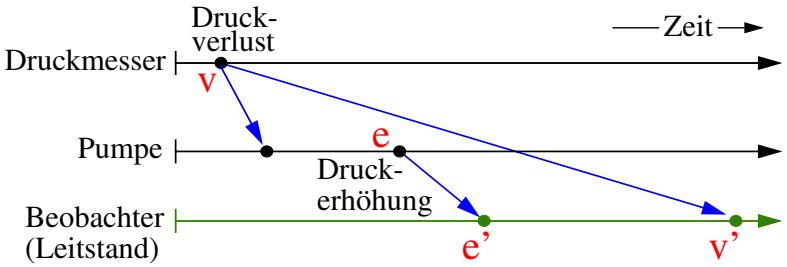
Technische Hochschule Zürich.

Brief an *George Hale*, Mount Wilson Observatory, Passadena

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!

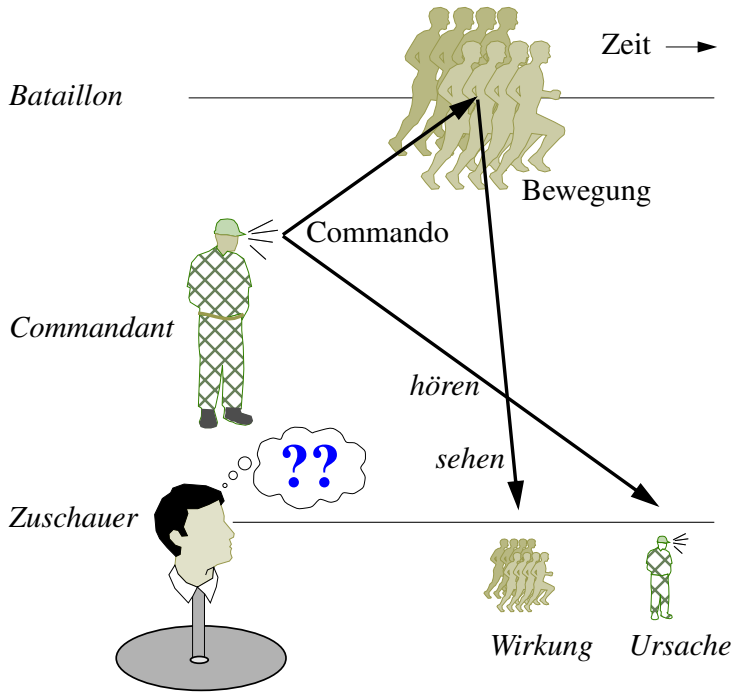
Frage:
Wie implementiert man kausal konsistente Beobachter?

Kausal (in)konsistente Beobachtungen

Das Beobachtungsproblem ist nicht neu...

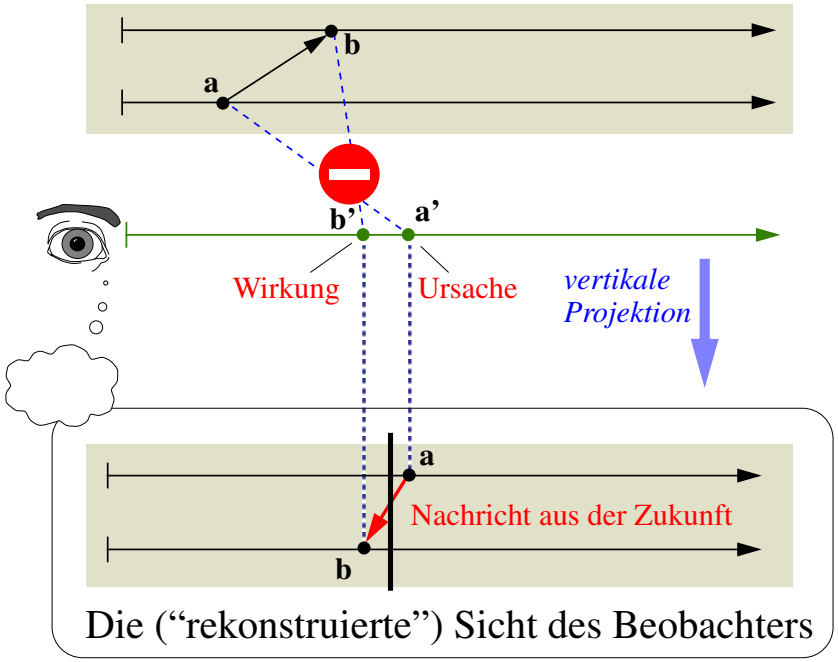
Wenn ein Zuschauer von der Ferne das Exercieren eines Bataillons verfolgt, so sieht er übereinstimmende Bewegungen desselben plötzlich eintreten, *ehe* er die Commandostimme oder das Hornsignal hört; aber aus seiner Kenntnis der *Causalzusammenhänge* weiss er, dass die Bewegungen die *Wirkung* des gehörten 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 kausaltreue 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

lineare Erweiterung oder Einbettung

Definition:
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!

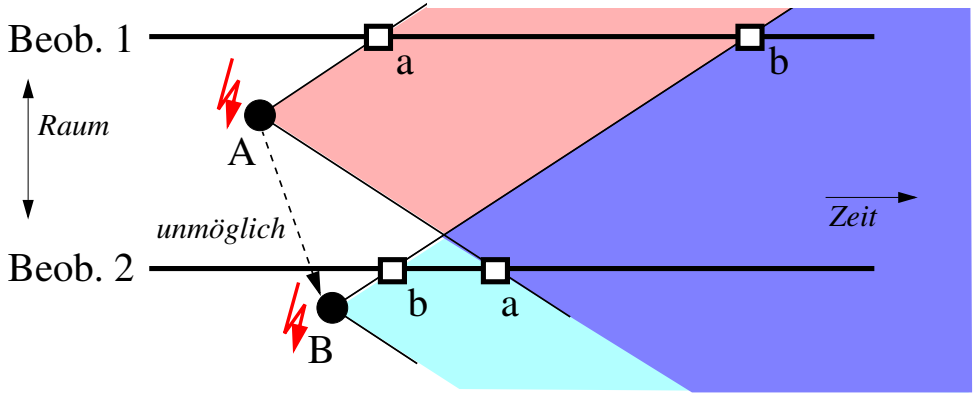
==> in den "wesentlichen" Aspekten stimmen alle Beobachter überein!
(die Kausalbeziehung ist also ein beobachterinvariantes, objektives Faktum)

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

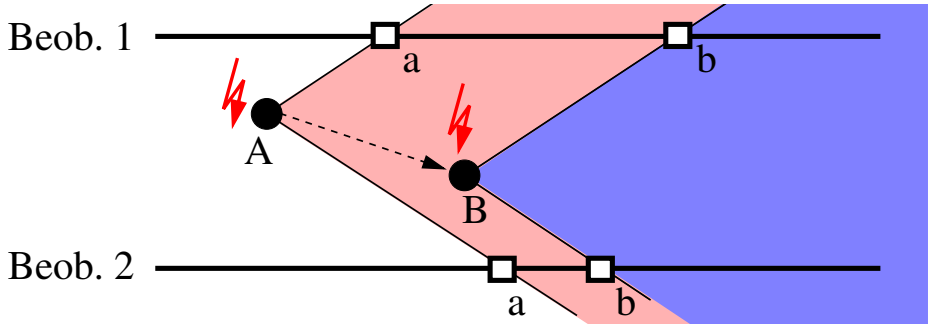
Relativierung der Gleichzeitigkeit

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

Lichtkegel-Prinzip der relativistischen Physik



A und B geschehen "gleichzeitig"
(jedenfalls *kausal unabhängig*!)

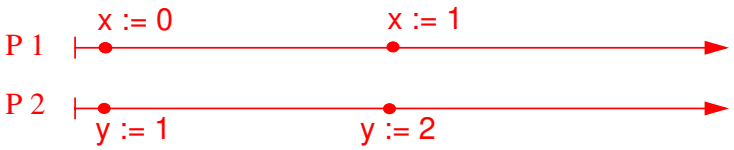


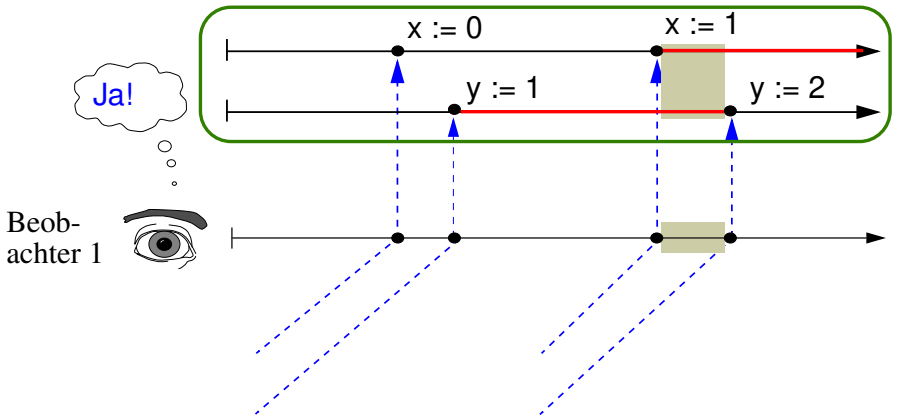
beobachterinvariant
==> *objektive Tatsache*

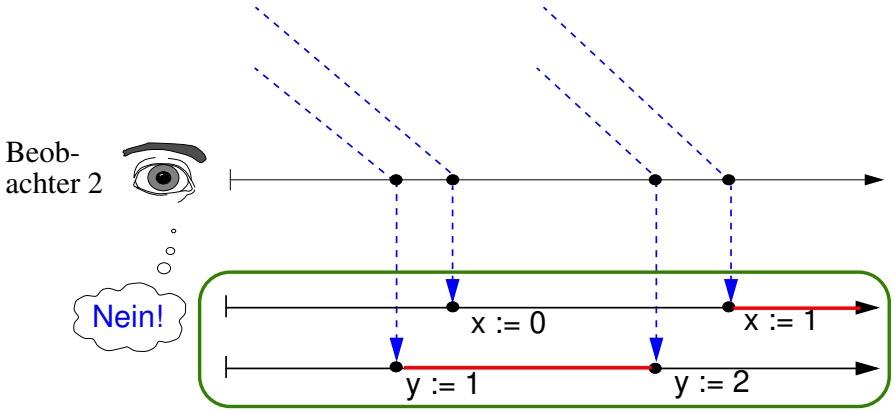
B liegt im Kegel von A -->
B hängt kausal ab von A -->
Alle Beobachter sehen B nach A

Das "Entdecken" globaler Prädikate

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





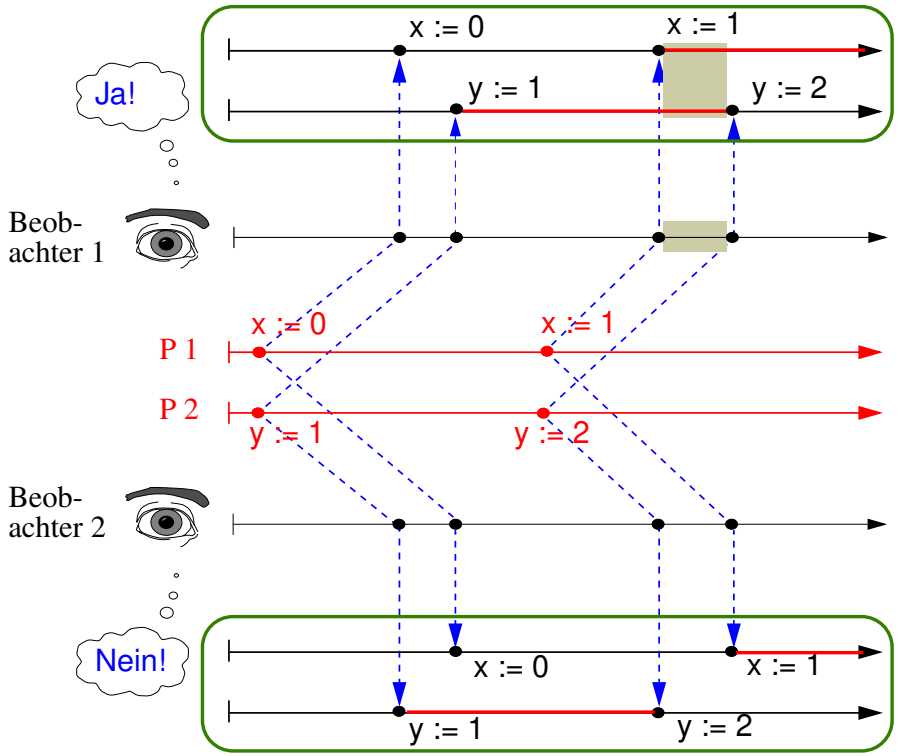


- Meldungen alle gleich schnell
- Beide Beobachtungen sind gleich “richtig”
- Die Beobachter stimmen bzgl. x = y nicht überein!

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

Das "Entdecken" globaler Prädikate

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

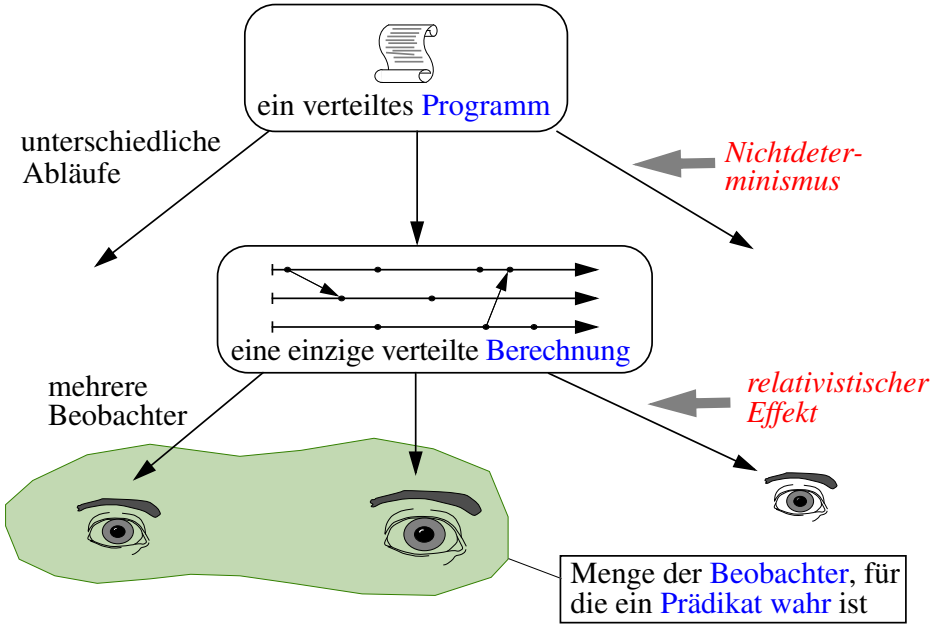


- Meldungen sind alle gleich schnell
- Beide (kausaltreuen!) Beobachtungen sind gleich “richtig”
- Die Beobachter stimmen bzgl. x = y nicht überein!

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!

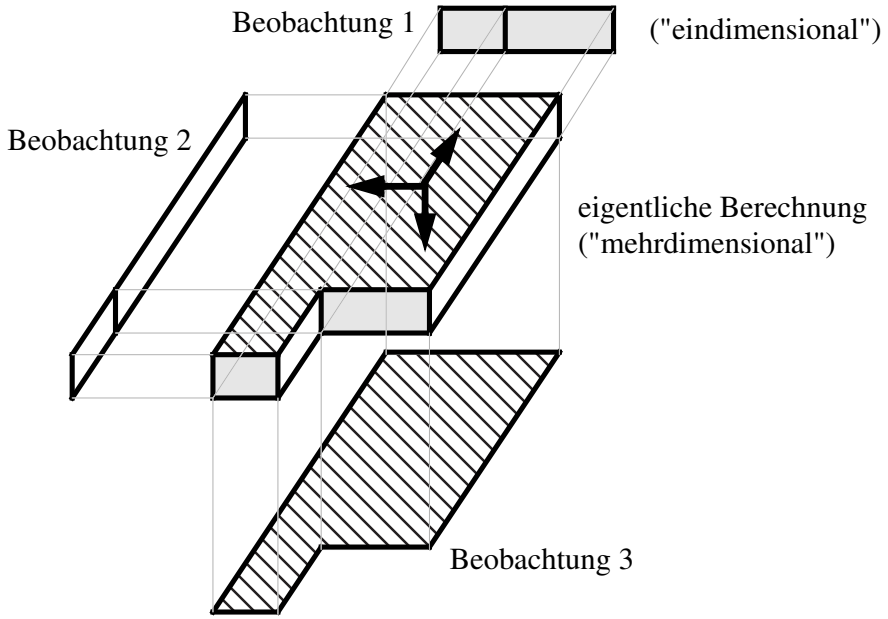


Konsequenz:

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

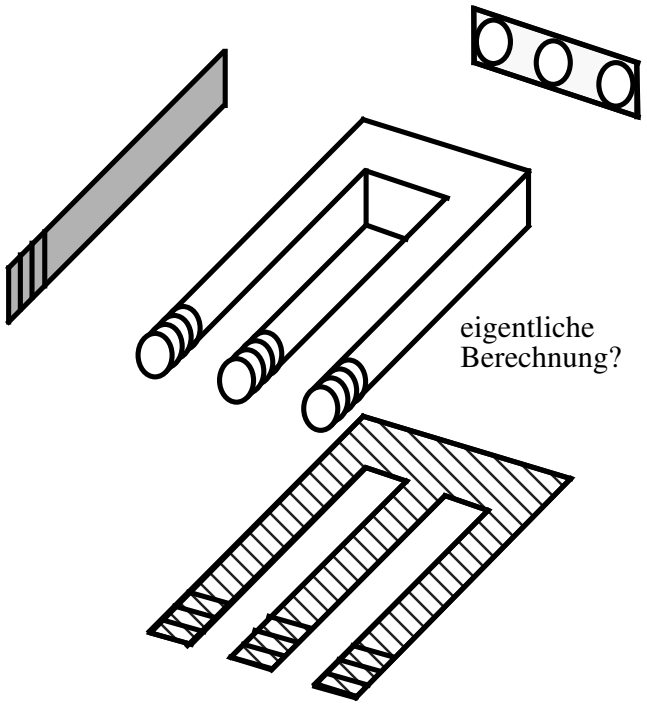
- im sequentiellen Fall: Berechnung = Beobachtung
- im verteilten Fall aber: Berechnung ≠ Beobachtung
- Gültigkeit von Prädikaten ist eine Eigenschaft einer Beobachtung, nicht einer Berechnung!
- gibt es sinnvolle beobachterinvariante Prädikate?

Beobachtung, Bild und Wirklichkeit



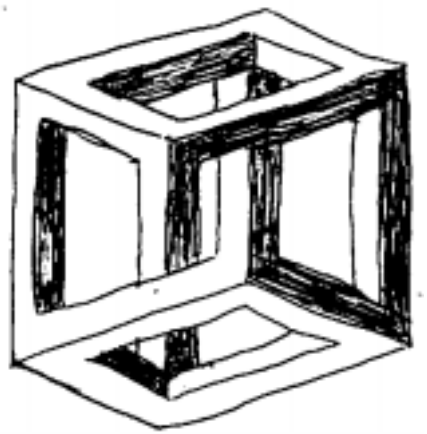
- Einige Eigenschaften gehen durch die Abbildung verloren
  - hier: kausale Unabhängigkeit
- Essentielle Eigenschaften sollen erhalten bleiben
  - hier: kausale Abhängigkeit
- Lässt sich die eigentliche Berechnung aus allen Beobachtungen rekonstruieren?
  - ja: Schnitt aller Linearisierungen ist Halbordnung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

Wirklichkeit ?

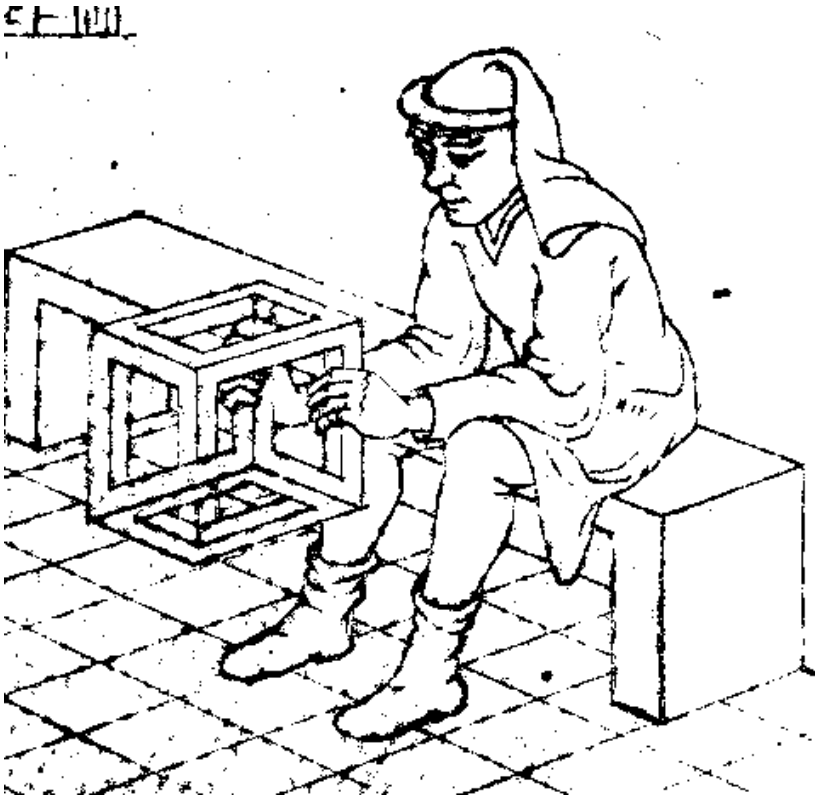


- Sind die verschiedenen Beobachtungen “verträglich”?
- Die beobachtete Wirklichkeit kann weitaus merkwürdiger sein, als eine Beobachtung vermuten lässt!
- Lassen sich die verschiedenen Beobachtungen zu einem konsistenten Bild zusammenfügen?

Ein inkonsistentes Bild



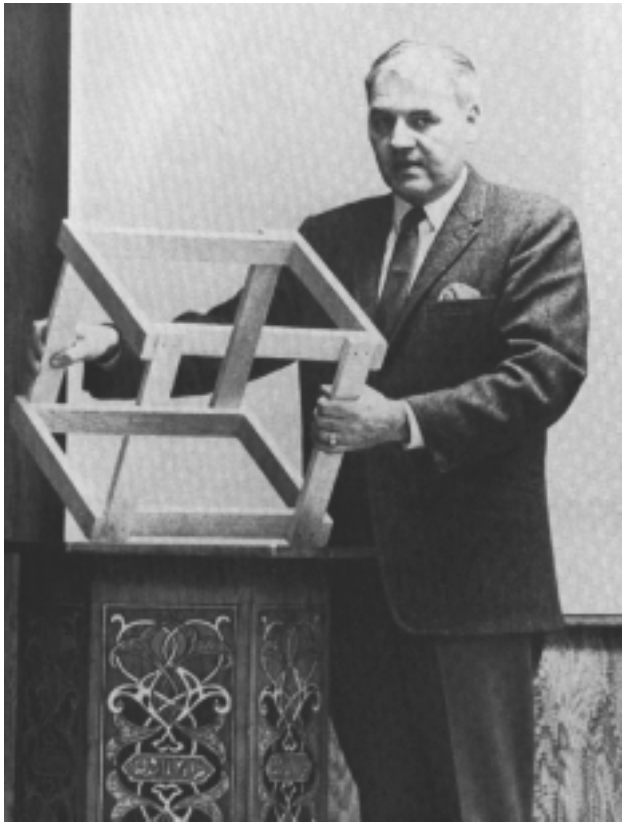
Wie heisst der Künstler?



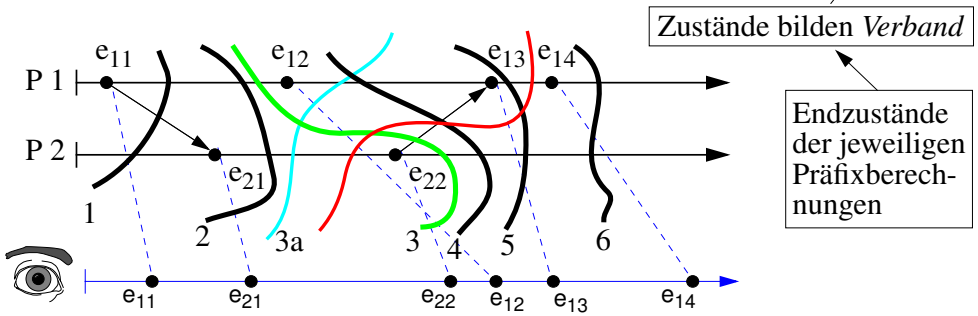
Wie heisst der Künstler?

M.C. Escher: Belvedere (1958)

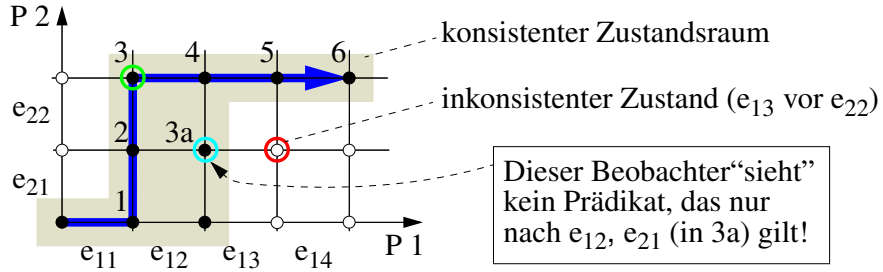
Ein Schnappschuss als Beweis



Das n-dimensionale Zustandsgitter



- *Beobachtung* =
  - Lineare Folge von Ereignissen
  - Folge damit assoziierter globaler Zustände



- *Beobachtung* = Pfad von links unten nach rechts oben
  (*kausaltreue 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 *einzige* (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?

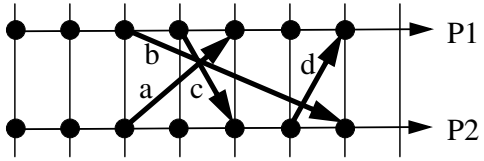
5) Sei $s \notin$ Obs. Gibt es stets ein $s' \in$ Obs, welches später als s ist? ... früher als s ist?

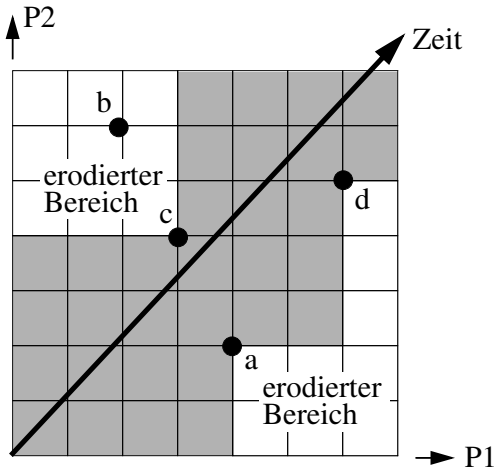
6) In einer Beobachtung Obs = $s_1,\ldots,s_k$ sei $s_i \in$ Obs und $e \in s_i$ (Zustand aufgefasst als Menge der bis dahin vergangenen Ereignisse)
   a) Gilt dann $e \in sj$ für alle $sj \in$ Obs mit $j > i$? Interpretation?
   b) Es sei $e' < e$. Gilt dann $e' \in si$?

7) Sind alle Beobachtungen der selben (endlichen) Berechnung gleich lang?

Der erodierte Zustandshyperwürfel

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



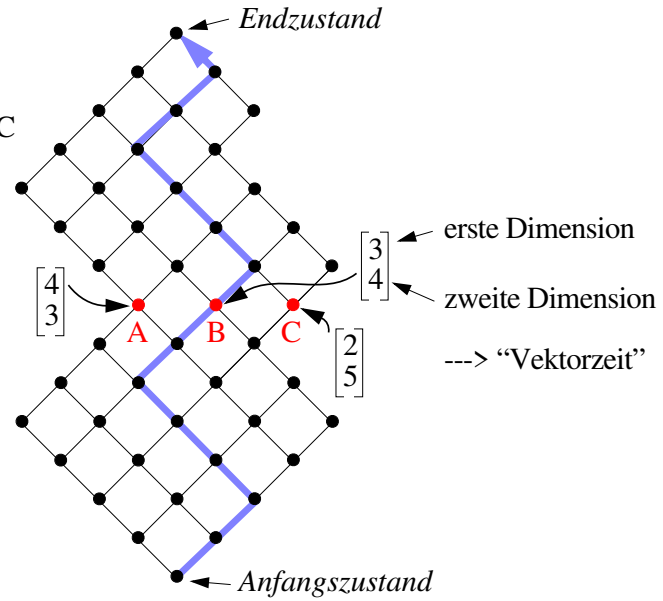


- "Erosion" der inkonsistenten Zuständen von den Ecken her
  - keine Nachricht wird empfangen, bevor sie gesendet wurde
  - ein Prozess blockiert in einer Empfangsanweisung, bis eine Nachricht verfügbar ist (und das zugehörige send somit ausgeführt wurde)
  - Nachrichten zur Synchronisation: sorgen dafür,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

Der Verband konsistenter Zustände

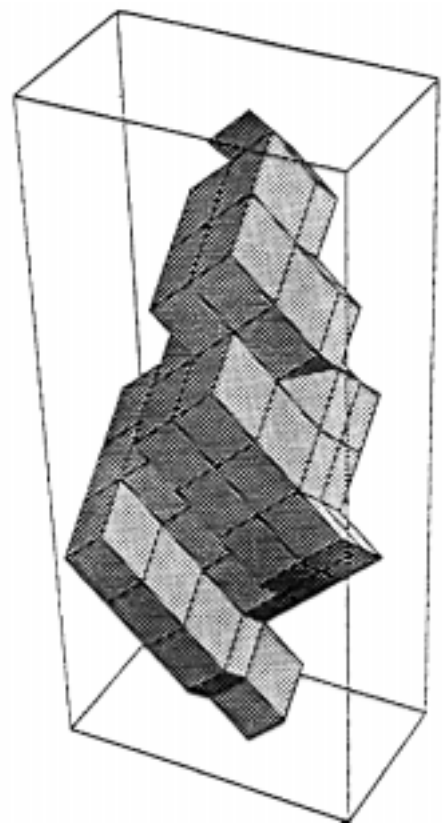
- Zu jeder Präfixberechnung gehört ein konsistenter Zustand.
- Die "echte" Folge globaler Zustände ist ein Pfad durch den Verband (ist aber unbekannt, wenn keine exakte globale Zeit existiert).

- drei "gleichzeitige" globale Zustände A, B, C
- Frage, durch welchen davon die Berechnung verlief, ist sinnlos!
- Äquivalenzklasse [A, B, C] (alle Zustände mit sieben Ereignissen)
- man weiss nur, dass die Berechnung durch diese *Klasse* lief



- 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



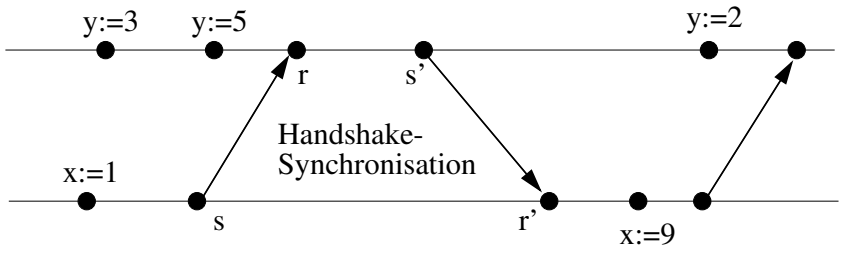
[Claude Jard et al., Rennes, Frankreich]

- 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?

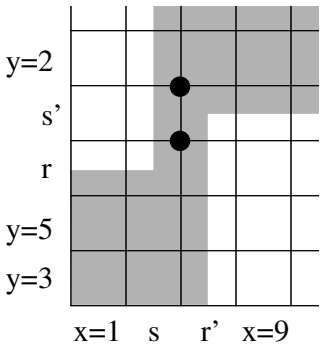
Synchronisationsengpässe

- 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"

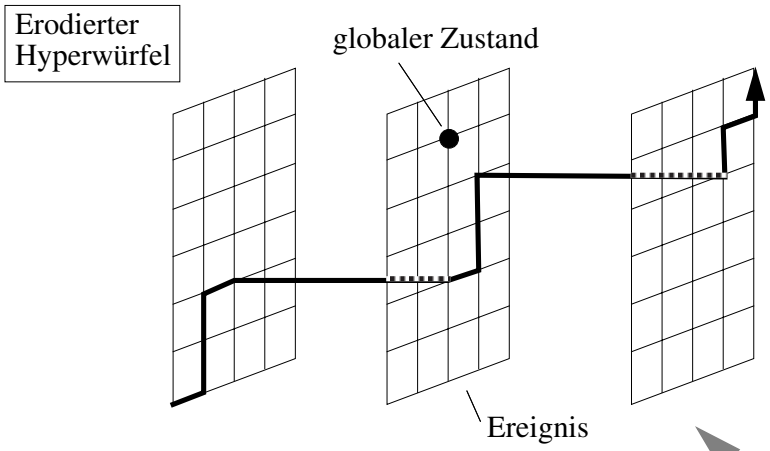
- Verallgemeinerung: "Barrier Synchronisation"
  (erst wenn alle Prozesse die Barriere erreicht haben, dürfen sie weiterlaufen)



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

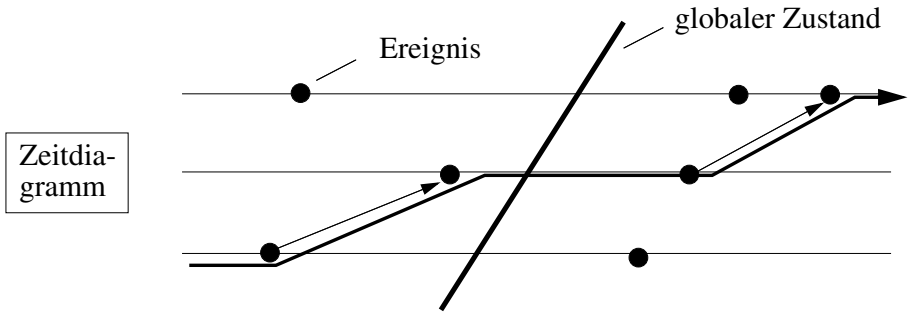


Punkt --> globaler Zustand
Schnitt(ebene) --> Ereignis
Pfad --> Kette von Zuständen

Hyper-ebene

Beide Diagramme repräsentieren die gleiche Berechnung

Punkt --> Ereignis
Schnitt --> globaler Zustand
Pfad --> Kette von Ereignissen



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"

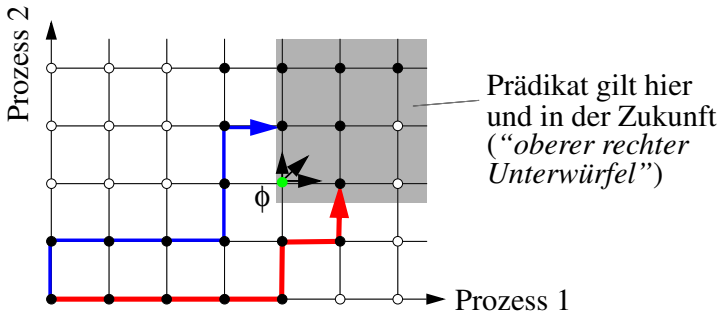
Genauere Spezifikation von Gültigkeit notwendig, z.B.:

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

Stabile Prädikate

- Informell: Monoton - "einmal wahr, immer wahr"
- Def.: wenn $c1 < c2$, dann $\Phi(c1) \Longrightarrow \Phi(c2)$

Halbordnung im Zustandsverband



- Sind *beobachterunabhängig*
  - jeder Beobachter muss durch den oberen rechten Würfel (Fairness...)
  - lassen sich daher einfach mit einer einzigen Beobachtung feststellen (jede andere Beobachtung wird Φ früher oder später ebenfalls entdecken)
- Für zwei Beobachtungen B_1, B_2 gilt: Falls B_1 Φ "entdeckt", dann gibt es einen *gemeinsamen späteren Zustand* (Verbandseigenschaft!) von B_1, B_2, bei dem Φ gilt
  - spätestens der Endzustand (bei endlichen Berechnungen)
  - B_1 kann z.B. die "echte" Ereignisfolge in Realzeit sein, B_2 eine Beobachtung
- Ein *gelegentlicher* (konsistenter) Schnappschuss genügt!
  - wenn der Schnappschussalgorithmus die Gültigkeit von Φ ermittelt, dann gilt Φ "jetzt" tatsächlich
  - wenn Φ "jetzt" gilt, dann meldet dies ein (jetzt gestarteter) Schnappschussalg.
- Es gibt wichtige stabile Prädikate, z.B. Terminierung, Garbage, Deadlock...