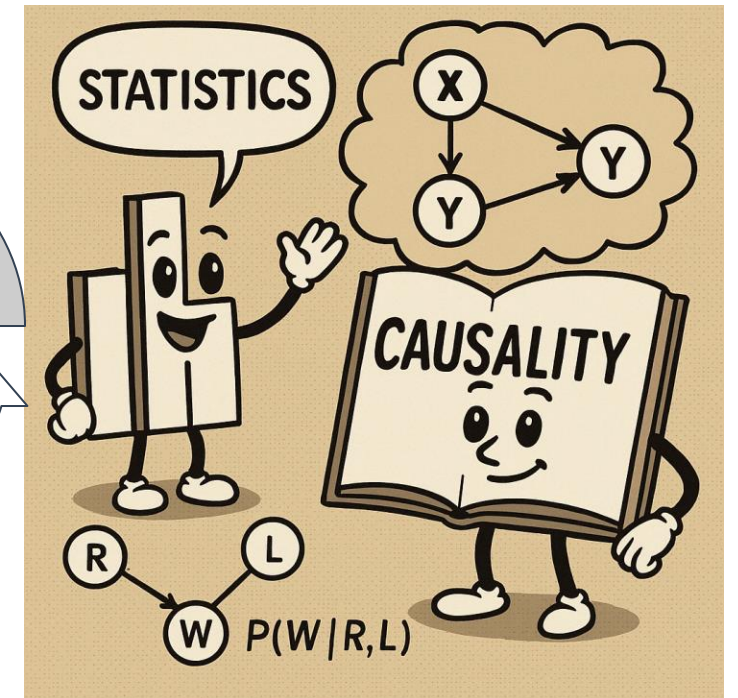
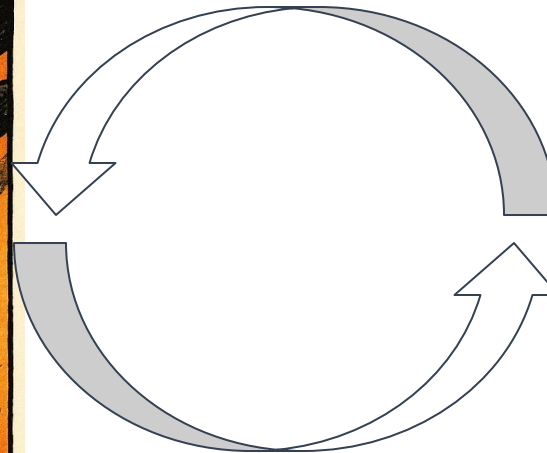
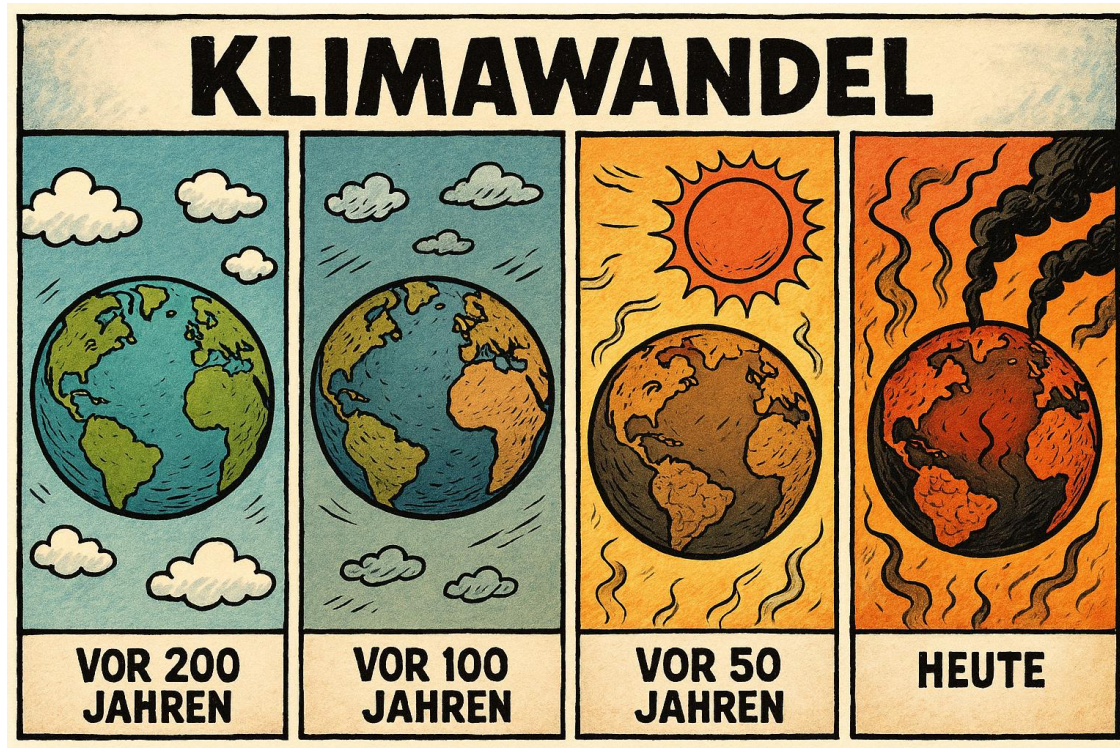


Causal Counterfactual Theory for the Attribution of Weather and Climate-Related Events

von A. Hannart, J. Pearl, F. E. L. Otto, P. Naveau and M. Ghil (1. Januar 2016)

DOI: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/97/1/bams-d-14-00034.1.xml>

Motivation



Motivation

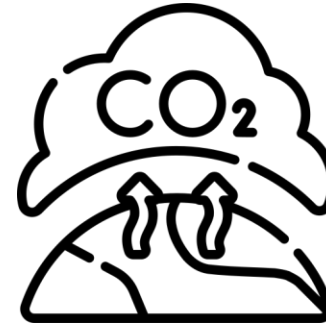
Wieso benötigen wir Kausalität im Kontext von Wetterextremen?



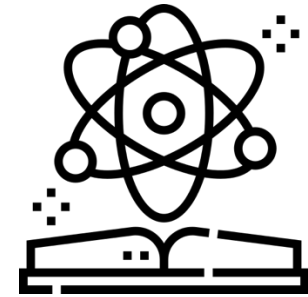
Öffentlicher Diskurs



Rechtliche Fragen



Maßnahmen gegen
Klimawandel

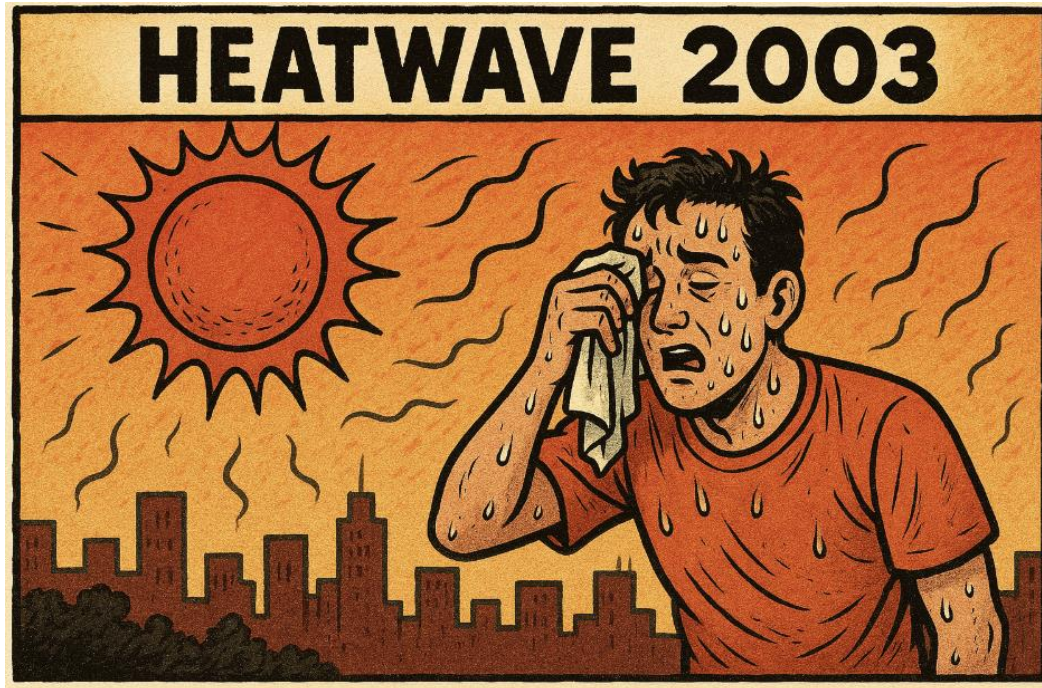


Wissenschaft



Ziel: Erweiterung des Event Attribution Frameworks um Definitionen und Methoden zur Untersuchung von Klima- und Wetterereignissen.

Motivation



Sind die menschenbedingten Emissionen Grund für die Hitzewelle in 2003? Oder wäre es auch ohne unser Handeln dazu gekommen?

Wie wird Kausalität definiert?

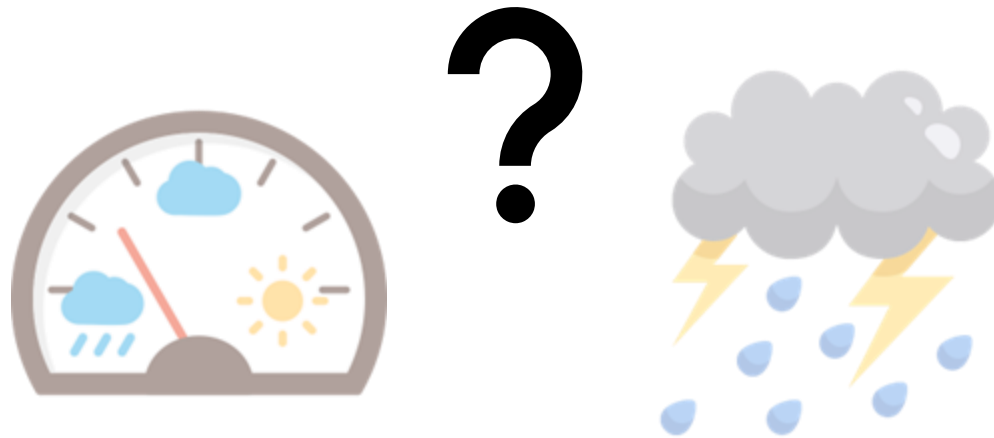
Definition Kausalität nach David Hume (Mai 1711 – August 1776):

Seien X und Y Events. Dann wird Y bedingt durch X, genau dann, wenn X nicht passiert wäre, wäre Y nicht passiert.

Definition Korrelation:

Eine Korrelation misst die Stärke einer statistischen Beziehung von zwei Variablen zueinander

Was ist Kausalität?



Wenn ich die Barometernadel drehe, fängt es dann zu regnen an?

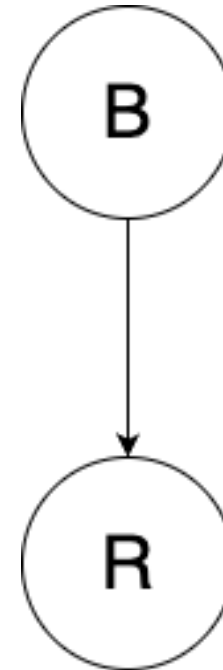
Wie kann ich das Modellieren?



?



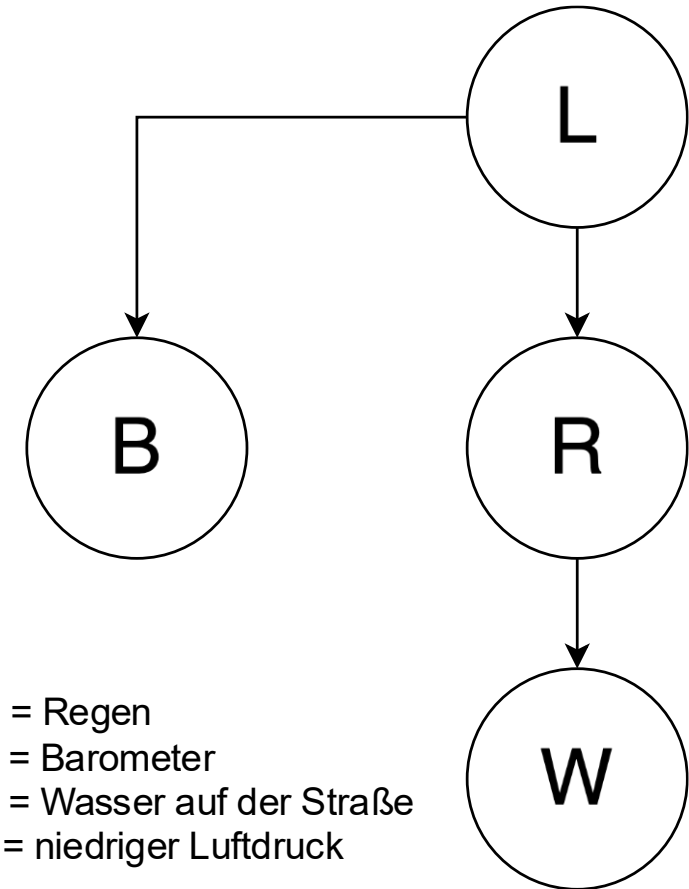
R = Regen
B = Barometer



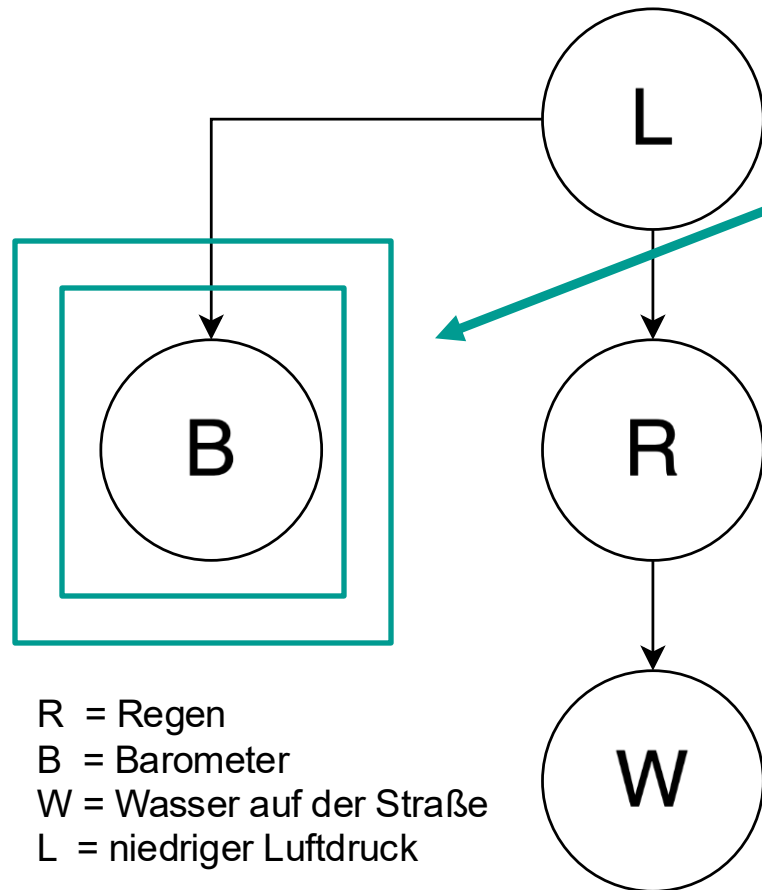
Wie kann ich das Modellieren?



?



Wie stelle ich Kausalität fest?



Wir „drehen“ jetzt an B und schauen was passiert

Bedingte
Wahrscheinlichkeit

$$P(R | B=1)$$

Wahrscheinlichkeit von R
wenn wir wissen B dreht
nach links.

Interventionelle
Wahrscheinlichkeit

$$P(R | \text{do}(B=1))$$

Wahrscheinlichkeit von R
wenn wir B manipulieren,
so dass B abnimmt.

Kausalität: notwendige Ursache

Wie wahrscheinlich ist es, dass ein Event ein anderes bedingt?

→ Necessary Causality (PN)

- Wahrscheinlichkeit dass Y nicht passiert wäre, wenn X nicht passiert wäre, gegeben X & Y sind passiert.
- Wie wahrscheinlich hat X, Y bedingt?
- X muss nicht die einzige Ursache gewesen sein
- Y wäre ohne X nicht passiert
- $PN = P(Y_0 = 0 | Y = 1, X = 1)$

Kausalität: hinreichende Ursache

Wie wahrscheinlich ist es, dass ein Event allein ein anderes auslöst?

→ Sufficient Causality (PS)

- Wahrscheinlichkeit, dass Y passiert wäre, wenn X passiert wäre, jedoch sind beide nicht eingetreten.
- X reicht als Ursache für Y.
- Y kann eintreten ohne, dass X passieren muss.
- $PS = P(Y_1 = 1 | Y = 0, X = 0)$

Kausalität: notwendige & hinreichende Ursache

$$PN = P(Y_0 = 0 | Y = 1, X = 1)$$

$$PS = P(Y_1 = 1 | Y = 0, X = 0)$$

$$PNS = P(Y_0 = 0, Y_1 = 1)$$

PNS = Y tritt nur dann ein, wenn X gegeben ist –
ohne X wäre Y nicht eingetreten.

Aber wann und für was brauchen wir PN, PS und PNS?

→ Rechtlicher Kontext: Bob schießt mit Waffe und trifft zufälligerweise Alice in 5km Entfernung.

- Hätte Bob nicht geschossen, wäre Alice nicht tot.
- Vor Gericht gilt, wenn $PN > 50\%$ dann schuldig. → **Bob ist schuldig.**

→ Maßnahmen Bestimmung: Politiker will Maßnahme gegen Amokläufe ergreifen. Bessere Aufklärung oder Schusswaffenverbote?

- Schusswaffenverkauf ist ein hinreichender Grund für einen Amoklauf. Aufklärung hingegen nur sehr geringer hinreichender Grund.
- Maßnahme mit größtem PS am wirkungsvollsten → **Verbot am sinnvollsten.**

Kausalität im Klima- & Wetterkontext

PN

Notwendige Ursache:

„Wie wahrscheinlich ist es, dass Y ohne X nicht passiert wäre.“

Wer hat Schuld an dem Wetterereignis?
Verantwortlichen bestimmen.

Sind unsere Emissionen Grund für die
Hitzwelle 2003?

PS

Hinreichende Ursache:

„Wie wahrscheinlich ist es, dass Y passiert wäre, wenn X passiert wäre, obwohl beides nicht passiert ist.“

Ist eine Maßnahme sinnvoll?

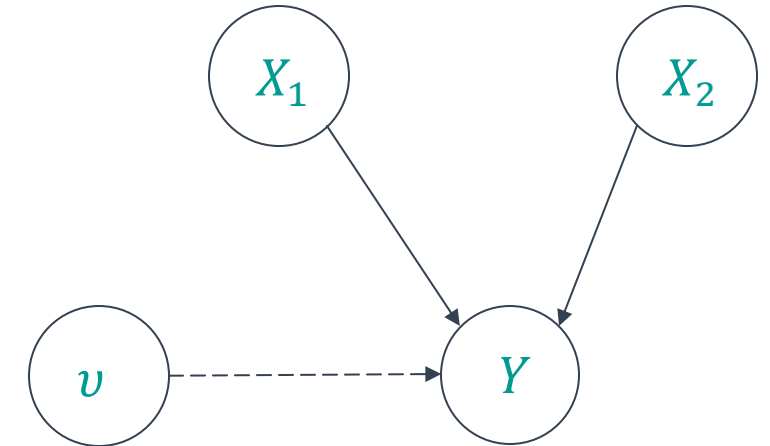
Wird es die nächsten 20 Jahre eine Hitzwelle geben, wenn wir unsere Emissionen um 50% reduzieren?

Generischer Ansatz für Kausalitäts-Untersuchungen in Event Attribution Frameworks

1. Definiere
 - Y (Antwortvariable)
 - Z (Klimaindex)
 - v (Schwellwert)
2. Leite die kausalen Effekte p_0, p_1 mittels in silicio Experimenten ab.
3. Berechne PN, PS für jeden Einfluss und formuliere Behauptung (IPCC2013)

Generischer Ansatz für Kausalitäts-Untersuchungen in Event Attribution Frameworks

1. Definiere
 - Y (Antwortvariable)
 - Z (Klimaindex)
 - v (Schwellwert)
2. Leite die kausalen Effekte p_0, p_1 mittels in silicio Experimenten ab.
3. Berechne PN, PS für jeden Einfluss und formuliere Behauptung (IPCC2013)



X_1 = anthropogene Einflüsse
 X_2 = natürliche Einflüsse
 Y = Klima-Reaktionsvariable über Klimaindex Z
 v = interne Variabilität im System

Generischer Ansatz für Kausalitäts-Untersuchungen in Event Attribution Frameworks

1. Definiere

- Y (Antwortvariable)
- Z (Klimaindex)
- v (Schwellwert)

2. Leite die kausalen Effekte p_0, p_1 mittels in silicio Experimenten ab.

$$\begin{aligned} p_0 &= P(Y = 1 | X = 0) && \leftarrow \text{kontrafaktische Welt} \\ p_1 &= P(Y = 1 | X = 1) && \leftarrow \text{faktische Welt} \end{aligned}$$

3. Berechne PN, PS für jeden Einfluss und formuliere Behauptung (IPCC2013)

Generischer Ansatz für Kausalitäts-Untersuchungen in Event Attribution Frameworks

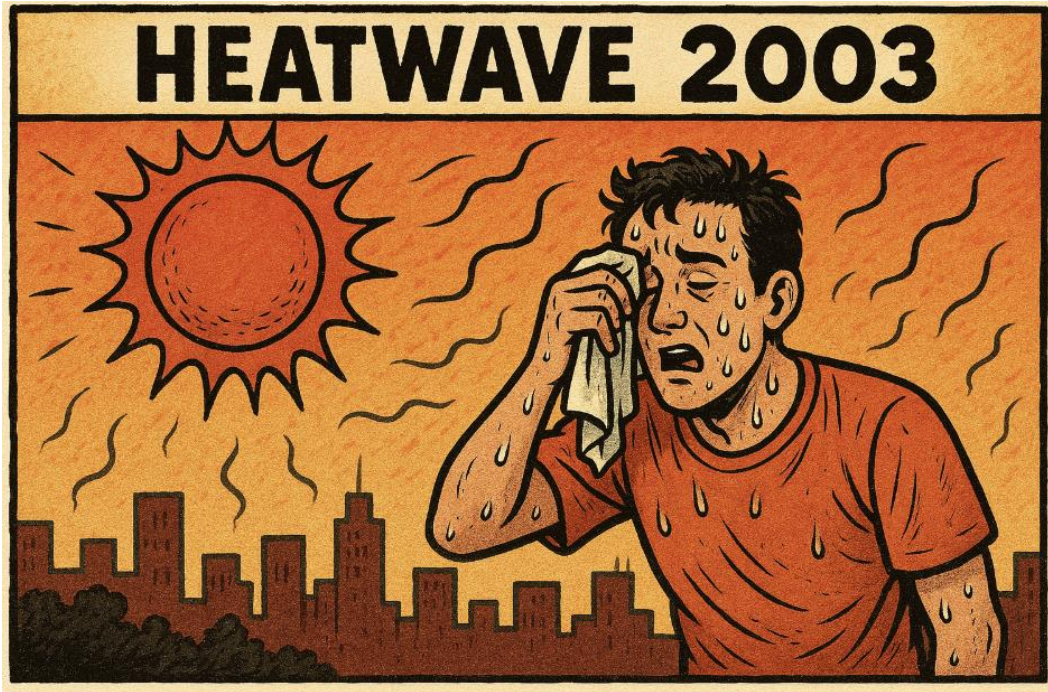
1. Definiere
 - Y (Antwortvariable)
 - Z (Klimaindex)
 - v (Schwellwert)
2. Leite die kausalen Effekte p_0, p_1 mittels in silicio Experimenten ab.
3. Berechne PN, PS für jeden Einfluss und formuliere Behauptung (IPCC2013)

$$PN = \max \left\{ 1 - \frac{p_0}{p_1}, 0 \right\}$$

$$PS = \max \left\{ 1 - \frac{1 - p_1}{1 - p_0}, 0 \right\}$$

$$PNS = \max\{p_1 - p_0, 0\}$$

Hitzewelle 2003:



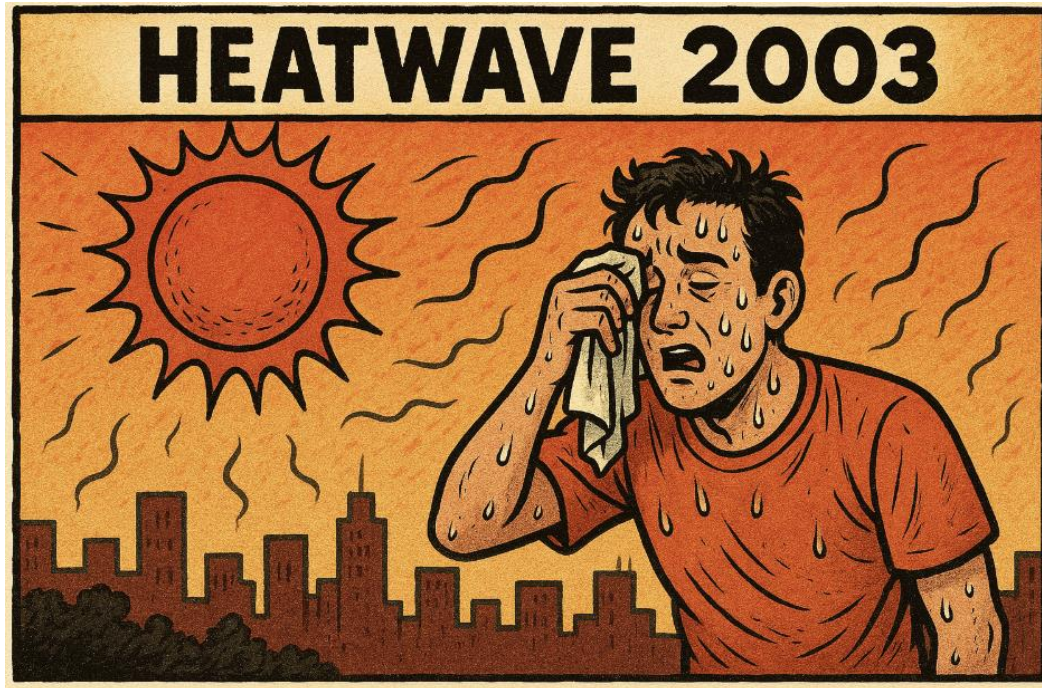
Temperaturrekorde

- Höchste gemessene Temperatur: 47,5 °C in Portugal
- Deutschland: Temperaturen bis zu 40,2 °C in Karlsruhe und Freiburg
- Schweiz: Rekord von 41,5 °C in Girona am 11. August

Todesopfer

- Europaweit: Schätzungsweise 70.000 vorzeitige Todesfälle
- Frankreich & Italien: Jeweils etwa 20.000 zusätzliche Todesfälle
- Deutschland: Rund 7.000 Todesfälle

Motivation



Sind die menschenbedingten Emissionen Grund für die Hitzewelle in 2003? Oder wäre es auch ohne unser Handeln dazu gekommen?

Event Attribution Framework angewandt auf die europäische Hitzewelle in 2003:

1. Definiere Variablen:

- Y (Antwortvariable) = Es ereignete sich eine Hitzewelle
- Z (Klimaindex) = mittlere Sommertemperaturanomalie in Europa
- v (Schwellwert) = $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$

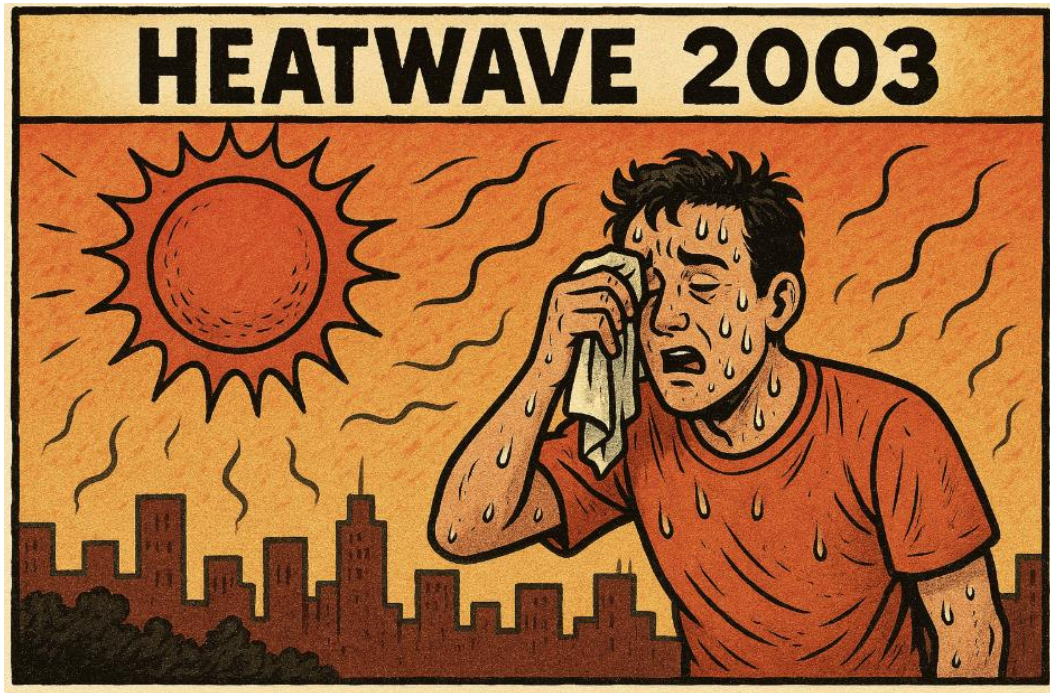
2. Wir leiten p_0, p_1 ab, in dem wir eine generalisierte Pareto Verteilung fitten.

- T_0 aus GPD sampeln mit $T_0 \in [350, 2500] \rightarrow T_0 = 1250\text{yr} \rightarrow p_0 = \frac{1}{1250}$
- T_1 aus GPD sampeln mit $T_1 \in [100, 1000] \rightarrow T_1 = 125\text{yr} \rightarrow p_1 = \frac{1}{125}$

3. Wir berechnen PN, PS bezüglich dem CO_2 - Einfluss.

- $PN = 1 - \frac{p_0}{p_1} = 1 - 0,1 = 0,9$
- $PS = 1 - \frac{1-p_1}{1-p_0} = 1 - \frac{0,992}{0,9992} \approx 0,0072$

Kausale Folgerungen für die europäische Hitzewelle 2003:



Folgerungen

Es ist sehr wahrscheinlich, dass die menschenbedingten CO_2 Emissionen eine notwendige Ursache für die Hitzewelle waren, jedoch keine hinreichende Bedingung.

Motivation



Sind die menschenbedingten Emissionen Grund für mindestens eine Hitzewelle im industriellen Zeitalter?

Event Attribution Framework angewandt auf Hitzewelle in Europa während der industriellen Periode:

1. Definiere Variablen:

- Z^* (Klimaindex) = Anzahl an Hitzewellen im Zeitraum der Länge τ mit Ende im Jahr 2003.
In einem Jahr ist eine Hitzewelle passiert, wenn $Z \geq v$
- v^* (Schwellwert) = 1
- Y^* (Antwortvariable) = aktiv, wenn sich mindestens eine Hitzewelle im Zeitraum $2004 - \tau \leq t \leq 2003$ vorgekommen ist.

2. Wir bestimmen p_0, p_1 für die einzelnen Jahre und berechnen dann p_0^*, p_1^* .

- $p_x^* = P(Z_x^* \geq 1) = 1 - (1 - p_x)^\tau$

3. Berechne PN, PS für jeden Einfluss in Abhängigkeit von τ .

	$\tau = 1$	$\tau = 200$	$\lim_{\tau \rightarrow \infty}$
PN	1	0,825	0
PS	0	0,767	1

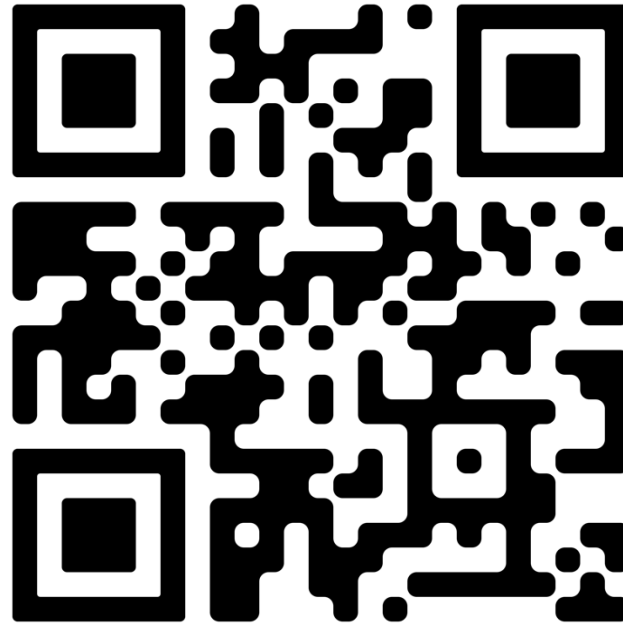
Industrielle Epoche dauert seit 200 Jahren an

$$\Rightarrow \tau = 200$$

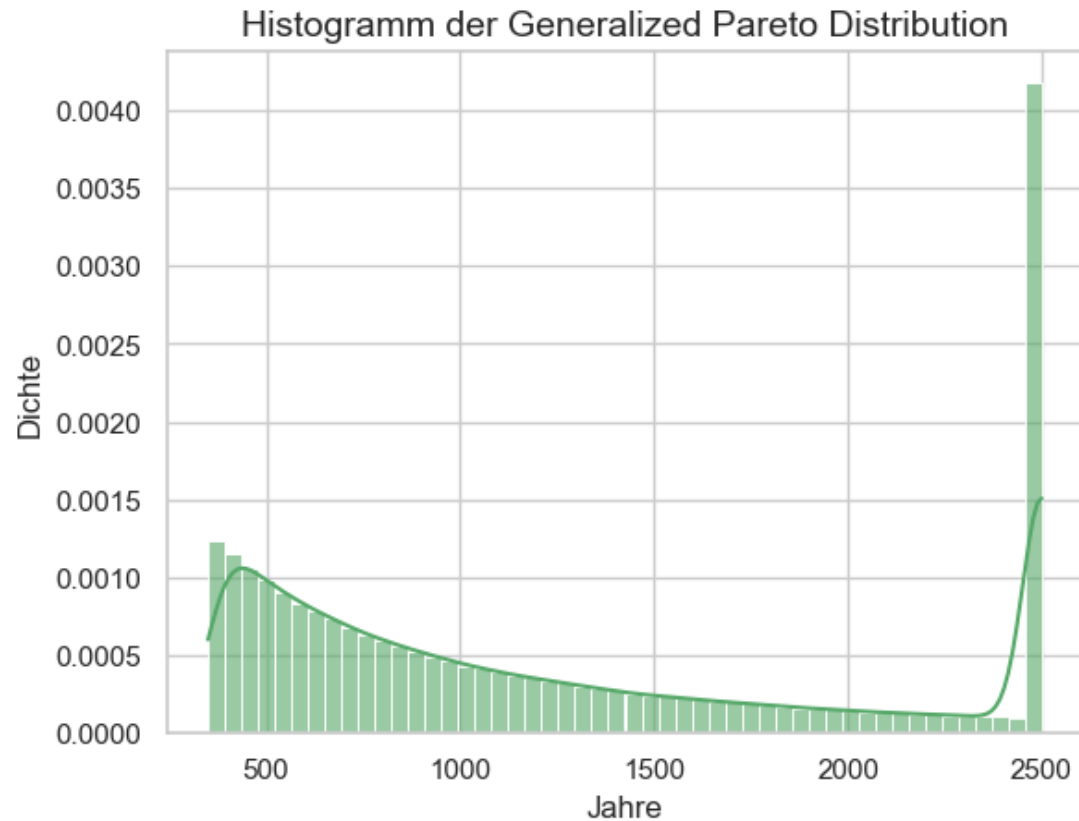
$$\Rightarrow p_0^* = 0,14; p_1^* = 0,80$$

Menschbedingten CO_2 Emissionen sind notwendige und hinreichende Ursache, dass mindestens eine Hitzewelle über die industrielle Periode in Europa aufgetreten ist.

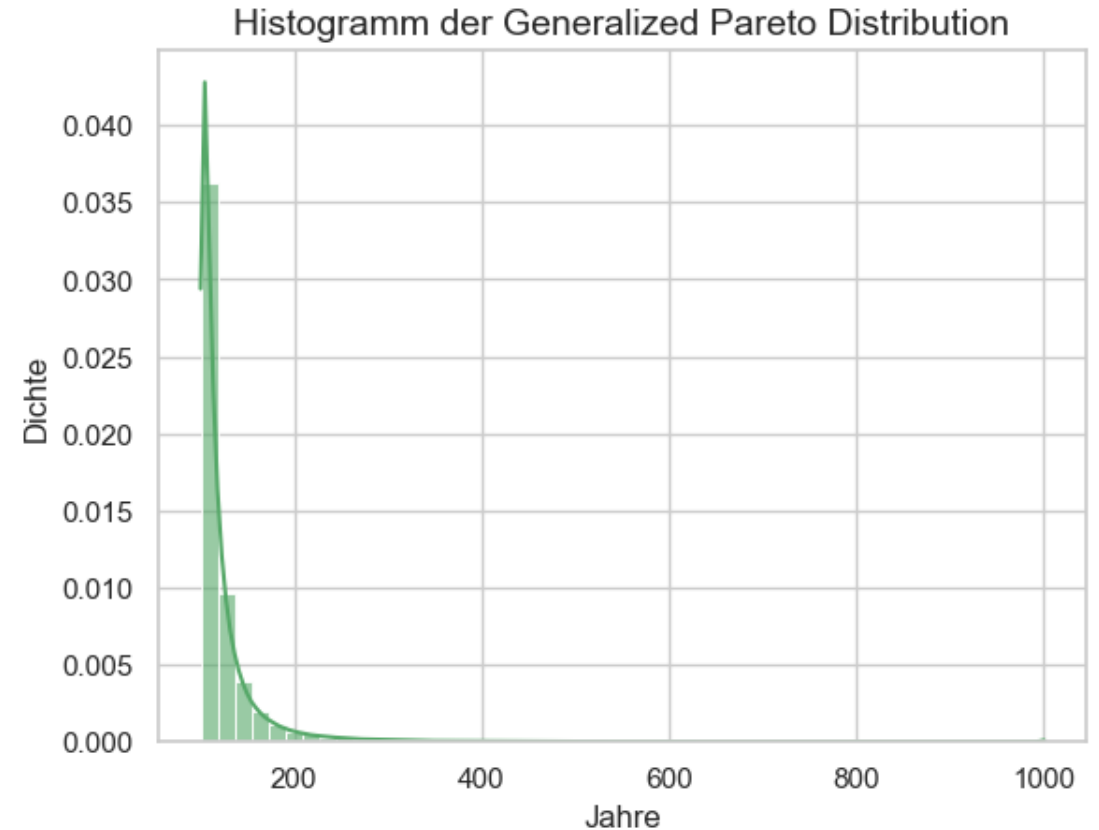
Alle Ressourcen



Generalized Pareto Distribution



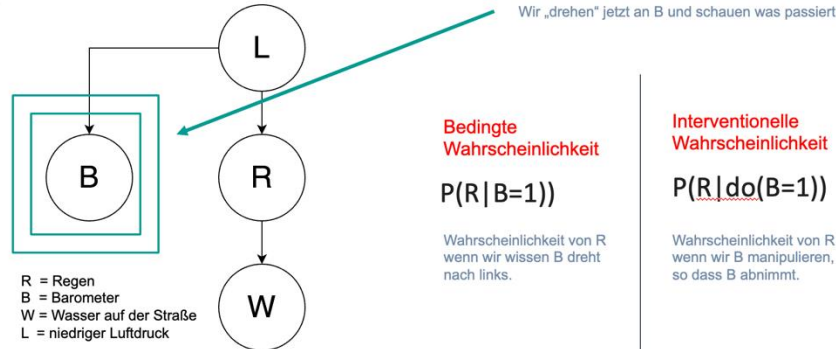
Wahrscheinlichkeitsverteilung für T_0



Wahrscheinlichkeitsverteilung für T_1

Übersicht für Fragen

Wie stelle ich Kausalität fest?



HTWG Hochschule Konstanz | Jonas Elspér | Advanced Topics in Data Analysis and Deep Learning

12.05.25 9

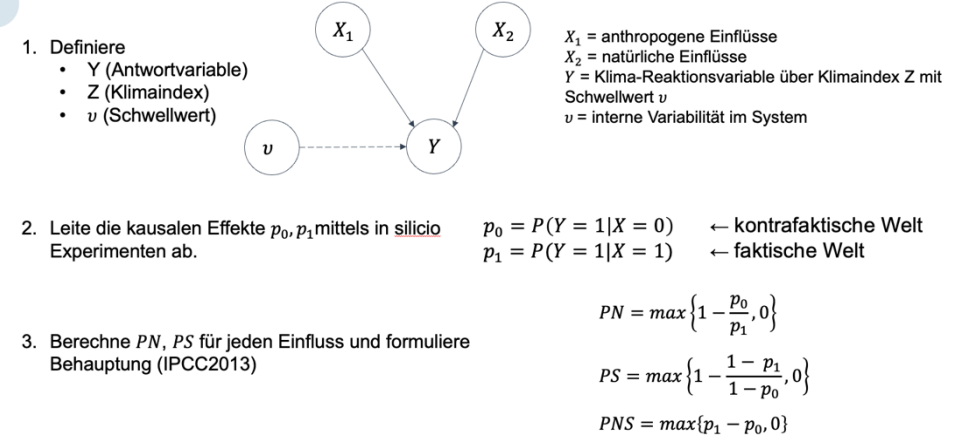
Event Attribution Framework angewandt auf die europäische Hitzewelle in 2003:

- Definiere Variablen:
 - Y (Antwortvariable) = Es ereignete sich eine Hitzewelle
 - Z (Klimaindex) = mittlere Sommertemperaturanomalie in Europa
 - v (Schwellwert) = $1,6^\circ\text{C}$
- Wir leiten p_0, p_1 ab, in dem wir eine generalisierte Pareto Verteilung fitten.
 - T_0 aus GPD sampeln mit $T_0 \in [350, 2500] \rightarrow T_0 = 1250\text{yr} \rightarrow p_0 = \frac{1}{1250}$
 - T_1 aus GPD sampeln mit $T_1 \in [100, 1000] \rightarrow T_1 = 125\text{yr} \rightarrow p_1 = \frac{1}{125}$
- Wir berechnen PN, PS bezüglich dem CO_2 - Einfluss.
 - $PN = 1 - \frac{p_0}{p_1} = 1 - 0,1 = 0,9$
 - $PS = 1 - \frac{1-p_1}{1-p_0} = 1 - \frac{0,992}{0,9992} \approx 0,0072$

HTWG Hochschule Konstanz | Jonas Elspér | Advanced Topics in Data Analysis and Deep Learning

12.05.25 21

Generischer Ansatz für Kausalitäts-Untersuchungen



Fußnote / Quelle

HTWG Hochschule Konstanz | Vorname Name | Titel Lehrveranstaltung, ggfs. konkretes Thema | © Urheberrechtlich geschütztes Material

08.05.25 18

Event Attribution Framework angewandt auf Hitzewelle in Europa während der industriellen Periode:

- Definiere Variablen:
 - Z^* (Klimaindex) = Anzahl an Hitzewellen im Zeitraum der Länge τ mit Ende im Jahr 2003. In einem Jahr ist eine Hitzewelle passiert, wenn $Z \geq v$
 - v^* (Schwellwert) = 1
 - Y^* (Antwortvariable) = aktiv, wenn sich mindestens eine Hitzewelle im Zeitraum $2004 - \tau \leq t \leq 2003$ vorgekommen ist.
- Wir bestimmen p_0, p_1 für die einzelnen Jahre und berechnen dann p_0^*, p_1^* .
 - $p_x^* = P(Z_x^* \geq 1) = 1 - (1 - p_x)^\tau$
- Berechne PN, PS für jeden Einfluss in Abhängigkeit von τ .

	$\tau = 1$...	$\lim_{\tau \rightarrow \infty}$
PN	1	...	0
PS	0	...	1

Industrielle Epoche dauert seit 200 Jahren an

$\Rightarrow \tau = 200$
 $\Rightarrow p_0 = 0,14; p_1 = 0,80$

CO_2 notwendige und hinreichende Ursache, dass mindestens eine Hitzewelle über die industrielle Periode in Europa aufgetreten ist.

HTWG Hochschule Konstanz | Jonas Elspér | Advanced Topics in Data Analysis and Deep Learning

08.05.25 22