Kapitel XII

KOMPLEXE KAUSALSTRUKTUREN

1 EINFÜHRUNG

Das in Kapitel IX vorgestellte kausale Schlussverfahren leistet zweierlei: (1) Es erschliesst kausale Relevanzen von Prüffaktoren für eine untersuchte Wirkung und (2) es verortet kausal relevante Faktoren in einer bestehenden Kausalstruktur unter der Voraussetzung, dass Prüffaktoren und bereits ermittelte Kausalfaktoren kausal unabhängig voneinander sind.[1] Diese Unabhängigkeitsannahme (UPK) schränkt die Reichweite unseres Schlussverfahrens auf Kausalzusammenhänge ein, die nur über eine Ebene[2] laufen. Zumal es jedoch eine der signifikantesten Eigenschaften von Ursachen und Wirkungen ist, sich in komplexen Strukturen und insbesondere Ketten zusammenzuschliessen, soll UPK im Folgenden aufgegeben und nach einer Erweiterung unseres Diagnoseverfahrens gesucht werden, die auch die Identifikation von Kausalketten ermöglicht. Zentrales Thema des vorliegenden Kapitels wird das *Schliessen* auf verkettete Kausalstrukturen sein. Dieses Problem – soviel sei an dieser Stelle bereits vorweggenommen – wird sich als deutlich verwickelter herausstellen, als man prima facie vielleicht denken würde.

2 IDENTIFIKATION KAUSALER VERKETTUNGEN IM RAHMEN KONTRAFAKTISCHER UND PROBABILISTISCHER KAUSALITÄT

Ursache-Wirkungsketten standen bis vor einigen Jahren nur äusserst selten im Zentrum kausaltheoretischer Untersuchungen. Philosophische Analysen der Kausalrelation fokussier(t)en ihr Interesse meist auf einfache kausale Abhängigkeiten zwischen einer einzigen Ursache und einer zugehörigen Wirkung.[3] Man hofft(e) offenbar, komplexe, sich über mehrere Ebenen erstreckende Kausalzusammenhänge liessen sich nach einer erfolgreichen Analyse einfacher Ursache-Wirkungsbeziehungen leicht einer theoretischen Wiedergabe zuführen. Doch diese Zuversicht hat sich mittlerweile für die prominentesten kausaltheoretischen Ansätze als vorschnell erwiesen.

So hat beispielsweise bereits Lewis (1979) gesehen, dass eine kontrafaktische Analyse der Kausalrelation (KK)[4], die seiner Ansicht nach für einfache Zusammenhänge zwischen zwei Ereignissen zufrieden stellende Resultate liefert, nicht ohne

[1] Vgl. die Unabhängigkeitsannahme UPK, Kapitel IX, Abschnitt 4.1.

[2] Zum Begriff der Ebene vgl. Kapitel VII, Abschnitt 2.2.3.

[3] Ein Autor, der nachdrücklich eine solche komplexe Zusammenhänge vereinfachende Analysestrategie verfolgte, war z.B. Patrick Suppes (vgl. Suppes (1970)). Ähnlich ging David Lewis vor. Auch er definierte kausale Abhängigkeit unter Absehung von komplexen Strukturen für genau zwei Ereignisse (vgl. Lewis (1973)).

[4] Vgl. Kapitel VI.

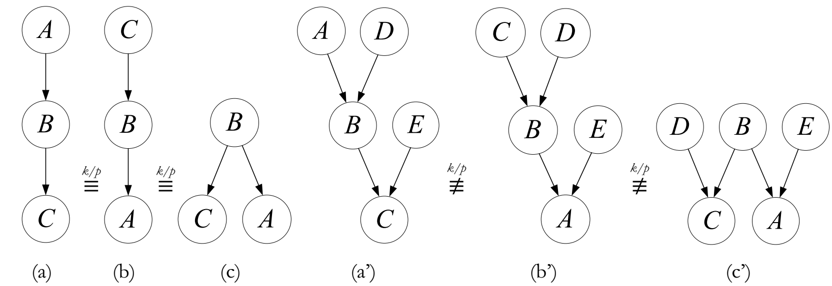


Abb. XII.1: (a), (b) und (c) sind drei kontrafaktisch bzw. probabilistisch äquivalente Kausalgraphen – entsprechend symbolisiert durch „$\overset{k/p}{\equiv}$“. Werden die drei Graphen in geeigneter Weise um weitere Faktoren erweitert, entstehen die drei kontrafaktisch und probabilistisch nicht äquivalenten Graphen (a’), (b’) und (c’).

weiteres zwischen den ersten drei in Abbildung XII.1 dargestellten Kausalstrukturen unterscheiden kann. Für (a), (b) und (c) gilt dasselbe Set an kontrafaktischen Abhängigkeiten,[5] d.h., sie sind *kontrafaktisch äquivalent*: Würde *A* nicht instantiiert, so auch *B* und *C* nicht, würde *B* nicht instantiiert, so auch *A* und *C* nicht, und würde *C* nicht instantiiert, so *A* und *C* ebenfalls nicht. Hausman (1998) hat eine Lösung für dieses Problem vorgeschlagen, die im Wesentlichen eine Erweiterung der in Abbildung XII.1 betrachteten Faktorenmenge verlangt.[6] Sobald etwa für die jeweiligen Wirkungen der Graphen (a), (b) und (c) zusätzliche Alternativursachen mitberücksichtigt und in die betreffenden Kausalstrukturen integriert werden (vgl. (a’), (b’) und (c’)), kann KK den epiphänomenalen Fall (c’) gegenüber den beiden nunmehr untereinander auch unterscheidbaren Ketten (a’) und (b’) abgrenzen. So gilt für (c’), dass *B* nicht eingetreten wäre, wenn *C* ausgeblieben wäre. Dasselbe ist zwar für (a’), nicht aber für den Graphen (b’) der Fall. Andererseits gilt für (c’), dass *B* nicht eingetreten wäre, wäre *A* ausgeblieben, was ebenso für (b’), jedoch nicht für (a’) gilt.

Spätestens seit Spirtes et al. (1993) ist auch im Forschungsfeld Probabilistischer Kausalität (PK)[7] bekannt, dass die Aufdeckung verketteter Kausalstrukturen mit Hilfe statistischer Diagnosealgorithmen mit grösseren Schwierigkeiten verbunden ist, als die Pioniere (z.B. Suppes (1970)) von PK ursprünglich erwartet haben dürften. So kann mit blossen wahrscheinlichkeitstheoretischen Mitteln ebenso wenig zwischen den in Abbildung XII.1 dargestellten Kausalstrukturen (a), (b) und (c) unterschieden werden.[8] Für sie alle gilt dasselbe Set an probabilistischen

[5] Zum Begriff der kontrafaktischen Abhängigkeit vgl. Kapitel VI, Abschnitt 2.

[6] Vgl. Hausman (1998), Kapitel 6.

[7] Vgl. Kapitel VI, Abschnitt 4.

[8] Vgl. z.B. Spirtes, Glymour und Scheines (2000 (1993)), S. 110, 169. Tatsächlich hat bereits Herbert Simon auf diese Schwierigkeiten Probabilistischer Kausalität im Umgang mit Kausalketten hingewiesen (vgl. Simon (1954), S. 468-469).

(Un-)Abhängigkeiten, und zwar sind A und C in allen Graphen bedingt auf B unabhängig voneinander, d.h. $\mathrm{P}(A \mid BC) = \mathrm{P}(A \mid B)$. Die Graphen (a), (b) und (c) in Abbildung XII.1 sind *probabilistisch äquivalent*.[9] Das heisst, bei nur drei untersuchten Faktoren kann PK selbst bei optimaler Datenlage ohne Zuhilfenahme nichtprobabilistischer Begriffe wie der Zeitrichtung Epiphänomene und Ketten nicht auseinander halten. Wie schon im Fall von KK gilt auch hier: Erst bei einer geeigneten Erweiterung der Menge betrachteter Faktoren werden der epiphänomenale und der verkettete Fall auf der Grundlage probabilistischer (Un-)Abhängigkeiten identifizierbar. So sind beispielsweise die Faktoren A und D in den Graphen (a') und (c') probabilistisch unabhängig voneinander, d.h. $\mathrm{P}(AD) = \mathrm{P}(A)\mathrm{P}(D)$, während dies für den Graphen (b') nicht gilt. Auf der anderen Seite besteht in den Graphen (b') und (c') eine probabilistische Abhängigkeit zwischen den Faktoren A und E, d.h. $\mathrm{P}(A \mid E) > \mathrm{P}(A)$, was für den Graphen (a') nicht der Fall ist.

KK und PK schliessen auf kausale Strukturen über Sets von kontrafaktischen bzw. probabilistischen (Un-)Abhängigkeiten. Aber diese Zuordnung von Kausalstrukturen zu entsprechenden Abhängigkeitssets ist für komplexe Zusammenhänge, d.h. solche, die mehr als zwei Faktoren umfassen, weder im Fall von KK noch von PK eindeutig in dem Sinn, dass unterschiedlichen komplexen Kausalzusammenhängen jeweils unterschiedliche Abhängigkeitssets zugeordnet sind. Eine erfolgreiche Identifikation von komplexen Kausalzusammenhängen ist damit so-

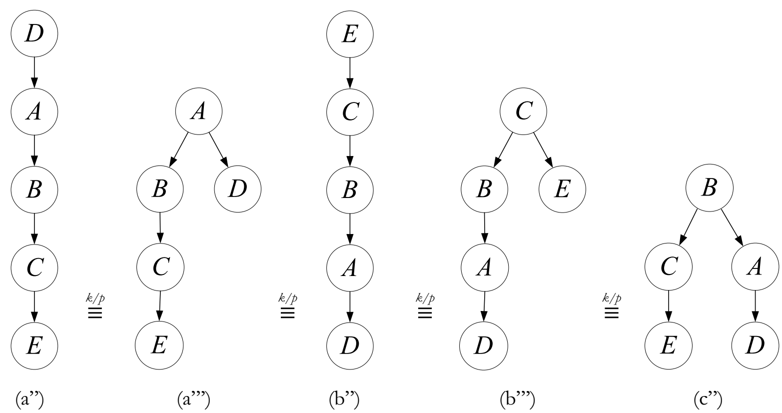


Abb. XII.2: Eine Erweiterung von (a), (b) und (c) aus Abb. XII.1, die zu den fünf hier dargestellten Graphen führt, löst die zwischen (a), (b) und (c) bestehenden kontrafaktischen bzw. probabilistischen Äquivalenzen nicht auf. Für (a), (b), (c) und diese fünf Graphen gelten dieselben kontrafaktischen bzw. probabilistischen Ab- und Unabhängigkeiten: Alle fünf Faktoren sind wechselweise kontrafaktisch voneinander abhängig bzw. es gilt: $\mathrm{P}(A \mid BC) = \mathrm{P}(A \mid B)$, $\mathrm{P}(D \mid AB) = \mathrm{P}(D \mid A)$ sowie $\mathrm{P}(E \mid BC) = \mathrm{P}(E \mid C)$.

[9] Zur probabilistischen Äquivalenz komplexer Kausalstrukturen vgl. Kapitel VI, Abschnitt 4.4, oder Pearl (2000), S. 19, 145, oder Verma und Pearl (1991).

wohl für Kontrafaktische wie Probabilistische Kausalität stets entscheidend von der Art der Erweiterung der Faktorenmenge abhängig. Die in Abbildung XII.2 dargestellten Erweiterungen von (a), (b) und (c) lösen die zwischen diesen Graphen bestehenden Äquivalenzen nicht auf. Auch (a''), (a'''), (b''), (b''') und (c'') sind vor dem Hintergrund von KK oder PK nicht zu unterscheiden. Oft gelingt es in diesem theoretischen Kontext also auch bei einer Analyse grosser Faktorenmengen nicht, Verkettungen von Kausalfaktoren eine Richtung zu geben oder sie gegen epiphänomenale Strukturen abzugrenzen.

3 Minimale Theorien und komplexe Kausalstrukturen

3.1 Einfache vs. komplexe Kausalstrukturen

Die in den letzten Jahren im Rahmen von KK und PK geführte Debatte rund um die Problematik kausaler Ketten hat eines deutlich werden lassen: Eine Analyse der Kausalrelation – egal, ob vor kontrafaktischem oder probabilistischem Hintergrund –, die als Ausgangspunkt simplifizierte Prozesse wählt und daran ihre kausale Begrifflichkeit entwickelt, wird spätestens beim Versuch einer korrekten Wiedergabe verketteter Strukturen die von ihr analysierte Faktorenmenge entgegen den ursprünglichen theoretischen Intentionen in geeigneter Weise erweitern müssen. Dabei entsteht das zusätzliche Problem, explizit zu machen, was „in geeigneter Weise" in diesem Zusammenhang zu bedeuten habe. Und nicht „in geeigneter Weise" erweiterbare komplexe Strukturen werden sich prinzipiell einer Identifikation entziehen.

Komplexe kausaler Abhängigkeiten, d.h. Kausalstrukturen, die mehr als zwei Faktoren umfassen, sind nicht ein Spezial-, sondern der Normalfall. Das Unterfangen der Entwicklung kausaler Begrifflichkeiten an simplifizierten Zusammenhängen steht deshalb spätestens bei der Übertragung dieser Begrifflichkeiten auf komplexere Kausalstrukturen vor Hindernissen, die, wenn überhaupt, nur durch eine erhebliche Anpassung der anfänglichen Analysestrategie überwunden werden können. Die Ursache-Wirkungsbeziehung zwischen *zwei* Faktoren ist nicht ein begriffliches Primitiv, aus dem sich kausale Abhängigkeiten in komplexeren Zusammenhängen rekursiv aufbauen oder ableiten lassen, sondern umgekehrt: Vom Bestehen kausaler Verknüpfungen zwischen Faktoren in komplexen Strukturen lässt sich auf die einfache Ursache-Wirkungsbeziehung zwischen zwei Faktoren schliessen.

Im Unterschied zu KK oder PK nimmt eine mit Minimalen Theorien operierende Regularitätstheorie (MT), wie wir in Kapitel V gesehen haben, von allem Anfang an Kausalzusammenhänge in den Blick, in die mehr als zwei Faktoren involviert sind. Dank dieser Analysestrategie gelingt MT mitunter eine im Vergleich zu KK oder PK deutlich unproblematischere theoretische Abbildung der Asymmetrie der Kausalrelation.[10] Diese Analyse der Asymmetrie zwischen Ursachen und Wirkun-

[10] Vgl. Kapitel V, Abschnitt 3.5.

gen als *viele*-zu-eins Abhängigkeit zwischen Antezedens und Konsequens einer Minimalen Theorie wird ihrerseits für die nachfolgende Untersuchung des Umgangs von MT mit Kausalketten von grosser Wichtigkeit sein. Von einem Kausalprozess kann MT zufolge erst dann sinnvollerweise die Rede sein, wenn für die jeweilige Wirkung *mindestens zwei* alternative Ursachen ermittelt werden. Ein Faktorenbündel AX_1, das alleine hinreichend und notwendig für einen anderen Ereignistyp W ist, kann nicht kausal interpretiert werden. Man würde in einem solchen Fall lediglich ein perfekt korreliertes Auftreten bzw. Ausbleiben von AX_1 und W feststellen, ohne eines der beiden Korrelate als Ursache des anderen ausweisen zu können. AX_1 und W wären je minimal hinreichend und notwendig füreinander. Um der Ursache-Wirkungsbeziehung die ihr eigentümliche Richtung zu geben, werden für jede Wirkung mindestens zwei alternative, voneinander unabhängige Ursachen benötigt. Damit hat die einfachste Kausalkette für MT nicht die Form der Graphen (a) oder (b) aus Abbildung XII.1, sondern diejenige von (a') und (b').

Auch die im Rahmen von MT verwendeten kausalen Schlussverfahren unterscheiden sich in einem für die Analyse von Kausalketten wichtigen Punkt von denjenigen anderer kausaltheoretischer Ansätze. Während etwa probabilistische Diagnosealgorithmen jeweils probabilistische (Un-)Abhängigkeiten zwischen Zweierpaaren von Faktoren prüfen und derart versuchen, komplexe Zusammenhänge Schritt für Schritt paarweise aufzubauen, analysiert das regularitätstheoretische allgemeine Testverfahren[11] kausale Abhängigkeiten zwischen einer grundsätzlich beliebig grossen Anzahl Faktoren. Es verortet einen Prüffaktor in einer bestehenden Struktur durch systematische Variation von An- und Abwesenheit *aller* bekannter Kausalfaktoren. Diese *Koinzidenzanalyse* in Verbindung mit der Definition kausaler Relevanz über Strukturen, die mindestens zwei alternative Ursachen für jede Wirkung aufweisen, scheint MT auf den ersten Blick gute Chancen zu verschaffen, die auf zu kleine Mengen an untersuchten Faktoren zurückzuführenden Probleme im Umgang mit Kausalketten anders als PK und KK gar nicht erst aufkommen zu lassen. Es wird also in der Folge zu prüfen sein, inwiefern dieser erste Eindruck zutrifft und sich die Analyse von Kausalketten vor dem Hintergrund von MT tatsächlich einfacher gestaltet als im Fall ihrer kausaltheoretischen Konkurrenz. Zu diesem Zweck wird Abschnitt 3 zunächst zeigen, in welcher Weise mittels Minimaler Theorien kausale Strukturen, die mehr als eine Ebene umfassen, abgebildet werden können, und anschliessend erörtert Abschnitt 4, wie von Koinzidenzen auf Kausalketten zu schliessen ist.

3.2 Komplexe Minimale Theorien

Einfache Minimale Theorien, wie sie in Kapitel V, Abschnitt 3.2 definiert worden sind, bilden die direkte kausale Relevanz von zwei oder mehr Faktoren(bündeln) für eine Wirkung ab. Dabei handelt es sich um die einfachsten gemäss MT möglichen Kausalstrukturen, die jeweils nur eine Ebene und Wirkung umfas-

[11] Vgl. Kapitel IX, Abschnitt 4.1.

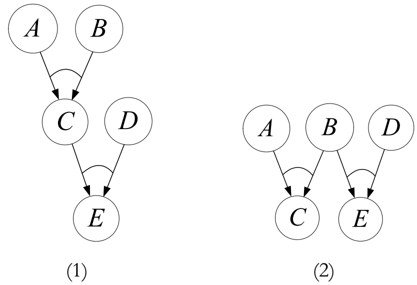


Abb. XII.3: Zwei komplexe Kausalzusammenhänge, die mit komplexen Minimalen Theorien wiedergegeben werden müssen.

sen und also weder Verkettungen noch epiphänomenale Abhängigkeiten enthalten. Um Kausalketten oder Epiphänomene mit Hilfe Minimaler Theorien wiederzugeben, müssen einfache zu *komplexen* Minimalen Theorien zusammengesetzt werden. Welchen Kriterien komplexe Minimale Theorien zu genügen haben und wie sie aus einfachen Minimalen Theorien aufzubauen sind, sei nachfolgend an zwei Beispielen veranschaulicht.

Für die in Graph (1) von Abbildung XII.3 dargestellte Kausalstruktur gilt, dass die Faktoren A und B Teil desselben Ursachenbündels von C *und* dass C und D Teil desselben Ursachenbündels von E sind. Dies wird von der folgenden komplexen Minimalen Theorie zum Ausdruck gebracht:

$$((ABX_1 \vee Y_C) \Rightarrow C) \,\&\, ((CDX_2 \vee Y_E) \Rightarrow E) \tag{I}$$

Graph (2) behauptet dagegen, dass A und B im selben Ursachenbündel von C *und* dass B und D im selben Ursachenbündel von E enthalten sind. Eine entsprechende Kausalaussage macht die folgende komplexe Minimale Theorie:

$$((ABX_1 \vee Y_C) \Rightarrow C) \,\&\, ((BDX_2 \vee Y_E) \Rightarrow E) \tag{II}$$

Komplexe Minimale Theorien entstehen durch *konjunktive* Verbindungen einfacher Minimaler Theorien. Indes handelt es sich nicht bei jeder beliebigen Konjunktion zweier einfacher Minimaler Theorien um eine komplexe Minimale Theorie. Im Gegensatz zu (I) und (II) sind (III) und (IV) keine komplexen Minimalen Theorien.

$$((ABX_1 \vee Y_C) \Rightarrow C) \,\&\, ((GHX_2 \vee Y_E) \Rightarrow E) \tag{III}$$

$$((ABX_1 \vee Y_C) \Rightarrow C) \,\&\, ((ABX_1 \vee Y_C) \Rightarrow C) \tag{IV}$$

Komplexe Minimale Theorien beschreiben *zusammenhängende* Kausalstrukturen. Dies jedoch tut (III) nicht. Damit eine Konjunktion aus zwei einfachen Minimalen Theorien MT_x und MT_y eine zusammenhängende Struktur beschreibt, muss mindestens ein Faktor sowohl in MT_x als auch MT_y enthalten sein. Ferner sind komplexe Minimale Theorien minimal in dem Sinn, dass sie keine redundanten Konjunkte enthalten. Eine Konjunktion identischer einfacher Minimaler Theorien nach dem Muster von (IV) genügt dieser Minimalitätsbedingung nicht und ist damit keine komplexe Minimale Theorie. Komplexe Minimale Theorien stellen *Kausalketten* oder *Epiphänomene* dar. Es können nur einfache Minimale Theorien zu komplexen verknüpft werden, die verschiedene Faktoren im Konsequens, d.h. verschiedene Wirkungen, haben. (IV) dagegen repräsentiert weder eine Kausalkette noch ein Epiphänomen.

Wir definieren den Begriff der komplexen Minimalen Theorie stufenweise:

Einfache und komplexe Minimale Theorien (I):[12]

(i) Ein Doppelkonditional mit einer minimal notwendigen Disjunktion minimal hinreichender Bedingungen im Antezedens und einem einzelnen Faktor im Konsequens derart, dass ein beliebiger Faktor im Antezedens bei jeder Erweiterung dieses Doppelkonditionals um weitere Faktoren darin enthalten bleibt, ist eine *einfache* Minimale Theorie.

(ii) Jede einfache Minimale Theorie ist eine Minimale Theorie (MT).

(iii) Eine Konjunktion aus zwei Minimalen Theorien MT_x und MT_y ist eine Minimale Theorie gdw.

  (a) mindestens ein Faktor sowohl in MT_x als auch MT_y enthalten ist und

  (b) MT_x und MT_y kein identisches Konsequens haben.

(iv) Minimale Theorien, die nicht einfach sind, sind *komplex*.

3.3 Zuordnung von Minimalen Theorien zu komplexen Kausalstrukturen

Die Frage, die es nun im Hinblick auf den Umgang von MT mit komplexen Kausalstrukturen zu untersuchen gilt, ist: Bilden komplexe Minimale Theorien komplexe Kausalstrukturen eindeutig ab oder ist die Zuordnung von komplexen Minimalen Theorien zu komplexen kausalen Strukturen in ähnlicher Weise unterdeterminiert, wie die Zuordnung von Sets kontrafaktischer oder probabilistischer (Un-)Abhängigkeiten zu komplexen Kausalzusammenhängen? Beginnen wir die Untersuchung dieser Frage, wie es im Rahmen Kontrafaktischer oder Probabilisti-

[12]Diese Definition wird weiter unten ergänzend spezifiziert (vgl. Abschnitt 4.4.2, S. 308).

scher Kausalität üblich ist (vgl. Abb. XII.1), bei den einfachsten komplexen Kausalstrukturen, solchen mit nur 3 bekannten Faktoren. Mit drei Faktoren kann je nach Anordnung der Faktoren und je nach Anzahl Kanten eine Vielzahl von verketteten oder epiphänomenalen Strukturen gebildet werden. Bei zwei Kanten sind es beispielsweise 15 Strukturen: Drei Faktoren können auf dreierlei Art angeordnet werden ($A-B-C$, $B-A-C$ und $A-C-B$) und für jedes dieser so genannten Graphenskelette[13] existieren vier verschiedene Ausrichtungen der Kanten, je zwei Ketten, ein Epiphänomen und eine Struktur alternativer Verursachung. Aus letzterem Fall ist mittels eines Bogens zusätzlich eine komplexe Ursache konstruierbar. Alle 15 dieser mit 3 Faktoren und 2 Kanten konstruierbaren Kausalgraphen – nachfolgend kurz „3-2-Graphen" genannt – beschreiben eine *andere* kausale Struktur, d.h., machen eine andere Kausalaussage. Eine Analyse der Kausalrelation muss diese Unterschiede wiedergeben. Dies ist, wie wir einleitend gesehen haben, mit Hilfe der Begriffe kontrafaktischer oder probabilistischer (Un-)Abhängigkeit nicht ohne weiteres möglich. Es gilt jetzt zu prüfen, wie MT bei der Lösung dieser Aufgabe abschneidet. Jedem unterschiedlichen 3-2-Graphen ist eine unterschiedliche Minimale Theorie zuzuordnen.

Der Kürze halber werden wir nicht allen 15 3-2-Graphen eine Minimale Theorie zuordnen, sondern uns auf ein Skelett, nämlich $A - B - C$, beschränken. Die Zuordnung von Minimalen Theorien zu den übrigen 10 3-2-Graphen gestaltet sich in analoger Weise. Abbildung XII.4 stellt die fünf mit dem Skelett $A - B - C$ konstruierbaren Kausalgraphen zusammen. Mit welchen Minimalen Theorien gibt MT die in den Graphen (a), (b), (c), (d) und (e) dargestellten Kausalstrukturen wieder?

Diese Graphen sind, wie es für Kausalgraphen vielfach der Fall ist, unvollständig. Minimale Theorien kennzeichnen im Antezedens aber jeweils eine minimal notwendige Bedingung. Da die Graphen (a), (b), (c), (d) und (e) keine Angaben über Restfaktoren minimal hinreichender Bedingungen oder alternative Ursachen ihrer jeweiligen Wirkungen bereithalten, verwenden wir wie gewohnt zur symbo-

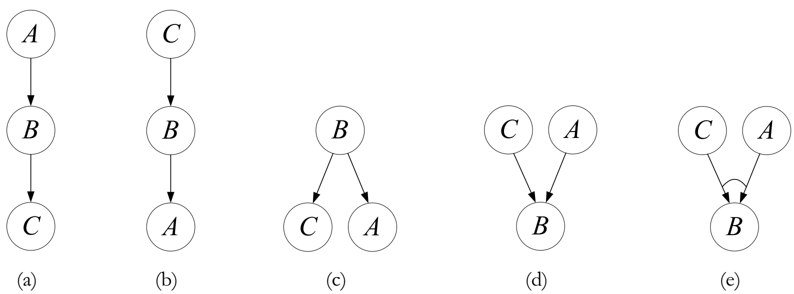


Abb. XII.4: Fünf mit dem Skelett $A - B - C$ konstruierbare Kausalgraphen.

[13] Zum Begriff des Graphenskeletts vgl. Pearl (2000), S. 12.

lischen Wiedergabe dieser Strukturen die Variablen X_1 und X_2 sowie Y_A, Y_B und Y_C. Derart wird die Unvollständigkeit von (a), (b), (c), (d) und (e) mit den Darstellungsmitteln Minimaler Theorien kenntlich gemacht. Wir ordnen den Graphen in Abbildung XII.4 somit der Reihe nach die folgenden komplexen Minimalen Theorien zu:

$$(AX_1 \vee Y_B \Rightarrow B) \,\&\, (BX_2 \vee Y_C \Rightarrow C) \qquad (MT_a)$$

$$(CX_1 \vee Y_B \Rightarrow B) \,\&\, (BX_2 \vee Y_A \Rightarrow A) \qquad (MT_b)$$

$$(BX_1 \vee Y_A \Rightarrow A) \,\&\, (BX_2 \vee Y_C \Rightarrow C) \qquad (MT_c)$$

$$AX_1 \vee CX_2 \vee Y_B \Rightarrow B \qquad (MT_d)$$

$$ACX_1 \vee Y_B \Rightarrow B \qquad (MT_e)$$

Unter den fünf Minimalen Theorien MT_a bis MT_e bestehen keinerlei Äquivalenzen. Daher kann jede von ihnen eindeutig einem der Graphen in Abbildung XII.4 zugeordnet werden. Jede expliziert die vom jeweiligen Graphen implizierte Kausalaussage. Die Zuordnung von 3-2-Graphen zu Minimalen Theorien ist im Gegensatz zur Zuordnung dieser Graphen zu Sets von kontrafaktischen oder probabilistischen (Un-)Abhängigkeiten nicht unterdeterminiert.

Diesen Befund gilt es jetzt zu untermauern. Dazu muss als Erstes ein Begriff der Äquivalenz Minimaler Theorien entwickelt werden. Zumal es sich bei Minimalen Theorien um semi-formale Ausdrücke – logische Ausdrücke ergänzt um nichtlogische Zusatzbedingungen – handelt, können gängige logische Äquivalenzbegriffe nicht so ohne weiteres auf sie angewandt werden.

Minimale Theorien legen fest, welche Koinzidenzen der in ihnen enthalten Faktoren auftreten und welche nicht. Die in einer Minimalen Theorie enthaltenen Faktoren bilden die *Faktorengruppe* der betreffenden Minimalen Theorie.[14] Minimale Theorien sind nicht mit allen der 2^n in ihrer Faktorengruppe $\mathcal{F}$ mit n Elementen logisch möglichen Koinzidenzen verträglich – sie sind nicht tautologisch. In diesem Sinn wählen sie eine echte Teilmenge der 2^n in $\mathcal{F}$ logisch möglichen Koinzidenzen aus, von denen sie behaupten, dass sie auch empirisch möglich seien, wobei eine Koinzidenz X genau dann als „empirisch möglich“ gelte, wenn es in Vergangenheit, Gegenwart oder Zukunft mindestens eine Instanz von X gibt. Minimale Theorien sollen mithin als äquivalent gelten, wenn sie dieselbe Faktorengruppe $\mathcal{F}$ haben und mit denselben der in $\mathcal{F}$ logisch möglichen Koinzidenzen verträglich bzw. unverträglich sind. Die Klasse der Koinzidenzen in $\mathcal{F}$, die mit einer Minimalen Theorie MT_x verträglich sind, heisse die *Koinzidenzgruppe* von MT_x in $\mathcal{F}$.[15] MT_x und MT_y sind also genau dann äquivalent, wenn sie eine identische

[14]Der Begriff der Faktorengruppe soll keine Assoziationen zur mathematischen Gruppentheorie wecken. Mit einer Faktorengruppe ist hier bloss eine Faktorenmenge gemeint, deren Elemente in einer Minimalen Theorie auftreten. Das heisst, den Elementen einer Faktorengruppe ist eine kausale Struktur unterlegt.

[15]Die Begriffe Faktorengruppe und Koinzidenzgruppe werden unten mit analoger Bedeutung auch auf Kausalstrukturen bzw. Kausalgraphen angewandt.

Faktorengruppe $\mathcal{F}$ und dieselbe Koinzidenzgruppe haben, und das heisst nichts anderes, als dass MT_x und MT_y über das Verhalten der Faktoren in $\mathcal{F}$ genau dasselbe aussagen. Um diesen Äquivalenzbegriff terminologisch gegen andere gängige Äquivalenzbegriffe abzugrenzen, sei im vorliegenden Kontext von *MT-Äquivalenz* die Rede.

Faktorengruppe: Die Faktorengruppe einer Minimalen Theorie MT (bzw. einer Kausalstruktur oder eines Kausalgraphen G) ist die Klasse der Faktoren, die in MT (bzw. G) enthalten sind.

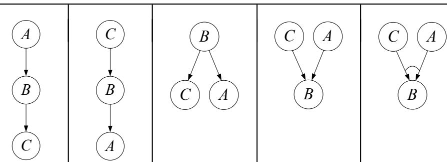
Koinzidenzgruppe: Die Koinzidenzgruppe einer Minimalen Theorie MT (bzw. einer Kausalstruktur oder eines Kausalgraphen G) in einer gegebenen Faktorengruppe $\mathcal{F}$ ist die Klasse der Koinzidenzen in $\mathcal{F}$, die mit MT (bzw. G) verträglich sind.

Äquivalenz Minimaler Theorien (MT-Äquivalenz): Zwei Minimale Theorien MT_x und MT_y sind genau dann *mt*-äquivalent, wenn MT_x und MT_y dieselbe Faktorengruppe und dieselbe Koinzidenzgruppe haben.

Dieser Äquivalenzbegriff für Minimale Theorien soll nun auf MT_a bis MT_e angewandt werden. Die Faktorengruppe der Graphen in Abbildung XII.4 besteht aus den drei Faktoren A, B und C, mit denen 8 logisch mögliche Koinzidenzen konstruierbar sind. Zusätzlich zu diesen drei bekannten Faktoren muss angesichts der Unvollständigkeit von Kausalgraphen eine ganze Reihe weiterer, unbekannter Faktoren veranschlagt werden, über welche die Variablen X_1 und X_2 bzw. Y_A, Y_B und Y_C laufen. Wollte man über diese ganze Faktorengruppe logisch mögliche Koinzidenzen bilden, ergäben sich mindestens $2^8 = 256$ Koinzidenzen, deren tabellarische Zusammenstellung weder übersichtlich noch dem hier verfolgten Zweck dienlich wäre. Die Tabelle XII.1 greift deshalb einige wenige, für die Prüfung auf MT-Äquivalenz besonders interessante Koinzidenzen heraus. Ausgewählt werden jeweils diejenigen Fälle, in denen sämtliche Restfaktoren X_1, X_2 minimal hinreichender Bedingungen, deren Teil A, B oder C sind, gegeben sind und A, B sowie C hinsichtlich ihres Auftretens und Ausbleibens systematisch durchvariiert werden. Die Konjunktion von X_1 und X_2 ist in der Tabelle vertreten durch X, d.h. $X = X_1X_2$. Die An- und Abwesenheit der Disjunkte im Gegenstandsbereich von Y_A, Y_B und Y_C wird in der Tabelle XII.1 offen gelassen. Auf jeder Zeile können Y_A, Y_B und Y_C gegeben oder nicht gegeben sein.

Für jede dieser 8 ausgewählten Koinzidenzen vermerkt Tabelle XII.1, ob sie mit der jeweils in der ersten Zeile einer Spalte aufgeführten Minimalen Theorie verträglich ist oder nicht. Ist Ersteres der Fall, so steht im entsprechenden Feld eine „1“, anderenfalls eine „0“. Aus Tabelle XII.1 ist leicht ersichtlich, dass keine

	MT_a	MT_b	MT_c	MT_d	MT_e
$ABC\,X$	1	1	1	1	1
$AB\overline{C}\,X$	0	1	0	1	0
$A\overline{B}C\,X$	0	0	1	0	1
$\overline{A}BC\,X$	1	0	0	1	1
$A\overline{B}\,\overline{C}\,X$	0	1	1	0	1
$\overline{A}\,\overline{B}C\,X$	1	0	1	0	1
$\overline{A}B\overline{C}\,X$	0	0	0	1	1
$\overline{A}\,\overline{B}\,\overline{C}\,X$	1	1	1	1	1



(a) (b) (c) (d) (e)

Tab. XII.1: Diese Tabelle ordnet den in der untersten Zeile dargestellten Kausalgraphen die in der obersten Zeile aufgeführten komplexen Minimalen Theorien zu. Zuordnungskriterium ist jeweils die Auflistung der (Un-)Verträglichkeiten von Minimaler Theorie bzw. Graph einerseits und den logisch möglichen Koinzidenzen in der Faktorengruppe bestehend aus A, B und C andererseits, d.h., Zuordnungskriterium ist die Koinzidenzgruppe einer jeweiligen Minimalen Theorie bzw. eines jeweiligen Kausalgraphen. X steht für X_1X_2.

zwei der Minimalen Theorien MT_a bis MT_e dieselbe Koinzidenzgruppe haben. Keine dieser Minimalen Theorien sind damit *mt*-äquivalent.

Über die jeweilige Koinzidenzgruppe einer Minimalen Theorie ordnet die Tabelle XII.1 MT_a, MT_b, MT_c, MT_d und MT_e je einen der Graphen in Abbildung XII.4 zu. Die in den Graphen von Abbildung XII.4 dargestellten einfachen Kausalstrukturen können also ohne nachträgliche Anpassungen oder Ergänzungen von MT abgebildet und mit Minimalen Theorien ausgedrückt werden. Der Grund für diesen im Vergleich zu KK oder PK unproblematischen Umgang mit einfachen 3-2-Graphen liegt in der von MT verfolgten, von Anfang an komplexe Strukturen berücksichtigenden Strategie zur Analyse kausaler Relevanz. MT definiert kausale Relevanz nicht über künstlich vereinfachte Kausalzusammenhänge, sondern versucht, der Komplexität kausaler Strukturen von Anfang an gerecht zu werden.

✍ ÜBUNG: *MT-Äquivalenz I*

✍ ÜBUNG: *MT-Äquivalenz II*

4 Schliessen auf komplexe Kausalstrukturen

4.1 Grundidee eines Schlussverfahrens

Vorausgesetzt, der Satz

(P) Verschiedene Kausalstrukturen haben verschiedene Koinzidenzgruppen.

gilt allgemein und nicht nur für die Beispiele in Abbildung XII.4, haben wir im letzten Abschnitt bereits die Grundzüge eines Verfahrens entwickelt, das unter Preisgabe der Unabhängigkeitsannahme UPK auf komplexe Kausalstrukturen schliesst. Denn gilt (P), so könnten Koinzidenzgruppen als Identifizierungskriterien für komplexe Kausalzusammenhänge herangezogen werden. Die obige Definition von MT-Äquivalenz garantiert, dass Kausalzusammenhängen, die verschiedene Koinzidenzgruppen generieren, keine *mt*-äquivalenten Minimalen Theorien zugeordnet werden. Gilt mithin (P), so wird vermittels der jeweiligen Koinzidenzgruppen eine eindeutige Zuordnung von komplexen Kausalstrukturen zu Minimalen Theorien möglich. Damit liesse sich ausgehend von Koinzidenzgruppen eindeutig auf kausale Strukturen schliessen. Oder anders gewendet: Koinzidenzgruppen könnten bei Gültigkeit von (P) als experimentelles Datenmaterial herangezogen werden, von dem ausgehend sich zunächst auf Minimale Theorien und hiervon in einem zweiten Schritt auf kausale Strukturen schliessen liesse. Das Verfahren freilich, das Koinzidenzgruppen Minimale Theorien zuordnet, wäre im Detail noch zu entwickeln. Doch bevor die Entwicklung eines solchen Verfahrens als sinnvolle Aufgabe in Angriff genommen werden kann, muss die Gültigkeit von (P) abgesichert sein. Denn gilt (P) nicht, ist klar, dass ausgehend von Koinzidenzgruppen mit keinem wie auch immer gearteten Verfahren eindeutig auf Kausalstrukturen zu schliessen ist. Koinzidenzgruppen wären in diesem Fall kein hinreichendes Individuationskriterium für kausale Zusammenhänge.

Bevor wir prüfen werden, ob (P) gilt oder nicht, muss noch eine zweite Voraussetzung eines Verfahrens zum Schliessen auf komplexe Kausalstrukturen thematisiert werden. Die Entwicklung eines kausalen Schlussverfahrens, das auch Strukturen erschliessen lässt, die über mehr als eine Ebene laufen, kann nur gelingen unter Preisgabe der Unabhängigkeitsannahme UPK.

4.2 Preisgabe von UPK

Die in Kapitel IX entwickelten Regeln kausalen Schliessens setzen jeweils die Unabhängigkeit von Prüffaktor und bereits diagnostizierten Kausalfaktoren einer untersuchten Wirkung voraus. Nur unter dieser Unabhängigkeitsannahme (UPK) ist es möglich, aus einer Vierertesttafel, wie sie Tabelle XII.2.1 darstellt, einen Schluss auf eine Struktur alternativer Verursachung zu ziehen (vgl. MT_f unten). Sobald die Unabhängigkeit der Faktoren A und B in dieser Testreihe jedoch nicht mehr vorausgesetzt wird, könnte das in Tabelle XII.2.1 zusammengestellte Testergebnis auch das Resultat einer Kausalkette sein. Das heisst, unter Preisgabe von

V_6	B	$\overline{B}$
A	1	0
$\overline{A}$	1	0

(1)

Felder von V_6	homogene Koinzidenzen
F1	$AX_1Y_BBX_2\overline{Y_W}W$
F2	$A\overline{X_1}\,\overline{Y_B}\,\overline{B}X_2\overline{Y_W}\,\overline{W}$
F3	$\overline{A}X_1Y_BBX_2\overline{Y_W}W$
F4	$\overline{A}\,\overline{X_1}\,\overline{Y_B}\,\overline{B}X_2\overline{Y_W}\,\overline{W}$

(2)

Tab. XII.2: Die entscheidende Voraussetzung für einen eindeutigen Kausalschluss aus der Vierertest-tafel[17] V_6 ist die Unabhängigkeitsvoraussetzung UPK. Untersuchte Wirkung in diesem Beispiel ist der Faktor W. Die Tabelle (2) ordnet den einzelnen Feldern von V_6 homogene Szenarien zu, die von der Kausalkette MT_g herrühren könnten.

UPK kann einzig aus der Vierertesttafel V_6 bei eingehaltener Homogenitätsbedingung nicht auf eine der beiden folgenden Minimalen Theorien geschlossen werden, zumal sie beide mit dem Testergebnis V_6 verträglich sind.

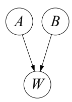
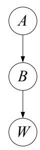
$$(AX_1 \vee BX_2 \vee Y_W) \Rightarrow W \tag{MT_f}$$

$$((AX_1 \vee Y_B) \Rightarrow B) \;\&\; ((BX_2 \vee Y_W) \Rightarrow W) \tag{MT_g}$$

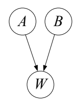
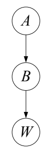
Neben MT_f kann auch auch MT_g das Testergebnis V_6 generieren, weil für die vier Testfelder homogene Szenarien existieren, in denen die von MT_g repräsentierte Kausalstruktur die Verteilung in V_6 erzeugt. Die Tabelle XII.2.2 ordnet den einzelnen Wirkungsfeldern von V_6 Koinzidenzen aus der Faktorengruppe von MT_g zu, die erstens homogen sind, zweitens das im jeweiligen Feld von V_6 dargestellte Vierertestresultat hervorrufen und drittens mit MT_g verträglich sind, d.h. von einer Kausalkette herrühren könnten.

Dass zwischen MT_f und MT_g nicht unterschieden werden kann, solange bloss auf Ausschnitte von deren Koinzidenzgruppen abgestellt wird, die sich auf die Faktoren A, B und W beschränken und sämtliche unbekannten Faktoren beliebig variieren lassen, ist auch leicht aus Tabelle XII.3.1 ersichtlich. Die Minimalen Theorien MT_f und MT_g sind, solange unbekannte Faktoren wie X_1 oder X_2 beliebig variieren können, mit allen logisch möglichen Kombinationen der Faktoren A, B und W verträglich. Das heisst aber nicht, dass MT_f und MT_g *mt*-äquivalent sind. Tabelle XII.3.2 zeigt, dass man bei einer Erweiterung der Menge betrachteter Faktoren durchaus Unterschiede zwischen MT_f und MT_g feststellt. So ist etwa der dritten Zeile von Tabelle XII.3.2 zu entnehmen, dass anders als im Fall alternativer Verursachung bei einer Kausalkette unabhängiges Variieren von AX_1 und B nicht möglich ist. Die Koinzidenz $AX_1\overline{B}X_2W$ ist mit Graph (f) bzw. MT_f, nicht aber mit Graph (g) bzw. MT_g verträglich.

[17] Zu dieser Vierertesttafel vgl. Kapitel IX, Abschnitt 4.3.

	MT_f	MT_g
ABW	1	1
$AB\overline{W}$	1	1
$A\overline{B}W$	1	1
$\overline{A}BW$	1	1
$A\overline{B}\overline{W}$	1	1
$\overline{A}\overline{B}W$	1	1
$\overline{A}B\overline{W}$	1	1
$\overline{A}\overline{B}\overline{W}$	1	1
	 (f)	 (g)

(1)

	MT_f	MT_g
$ABW\,X$	1	1
$AB\overline{W}\,X$	0	0
$A\overline{B}W\,X$	1	0
$\overline{A}BW\,X$	1	1
$A\overline{B}\overline{W}\,X$	0	0
$\overline{A}\overline{B}W\,X$	1	1
$\overline{A}B\overline{W}\,X$	0	0
$\overline{A}\overline{B}\overline{W}\,X$	1	1
	 (f)	 (g)

(2)

Tab. XII.3: Tabelle (1) stellt die Verträglichkeiten der in der obersten Zeile genannten Minimalen Theorien bzw. der in der untersten Zeile aufgeführten Graphen mit demjenigen Ausschnitt aus deren Koinzidenzgruppen dar, der ausschliesslich die Faktoren A, B und W enthält. Tabelle (2) dagegen expandiert die betrachtete Faktorengruppe, indem hier die Faktoren X_1 und X_2 mit einbezogen, und zwar konstant gehalten werden. X in (2) steht also für X_1X_2.

Dieses Beispiel zeigt zweierlei: (1) Die Aufgabe der Unabhängigkeitsvoraussetzung UPK hat zur Folge, dass aus Vierertesttafeln, die nur einen sehr beschränkten Ausschnitt der in einen untersuchten Kausalprozess involvierten Faktoren berücksichtigen, je nach Testresultat mit den bisherigen Schlussregeln kein eindeutiger Kausalschluss möglich ist; (2) eine Expansion der betrachteten Faktorenmenge kann jedoch zu einer Identifikation des untersuchten Prozesses führen. Man wird also bei mehrdeutigen Vierertestresultaten einen kausalen Schluss zurückstellen müssen bis eine geeignete Expansion der untersuchten Faktorenmenge Klärung bringt.

Wir können die im letzten Abschnitt skizzierte Grundidee eines Schlussverfahrens, das komplexe Kausalstrukturen ermittelt, mithin in mehrfacher Hinsicht konkretisieren. Damit überhaupt die Möglichkeit besteht, Kausalketten zu erschliessen, darf der Fall nicht ausgeschlossen werden, dass die im Rahmen der erweiterten Testanlage systematisch durchvariierten Faktoren in einem kausalen Abhängigkeitsverhältnis zueinander stehen. Nicht jeder Prüffaktor ist notwendigerweise ein Wurzelfaktor. Das heisst, ein Verfahren, das auch auf Ketten schliessen lässt, muss UPK aufgeben. Der Verzicht auf UPK hat zur Folge, dass gewisse Vierertestresultate nicht mehr als Grundlage eines eindeutigen Kausalschlusses dienen. Eine Expansion der untersuchten Faktorenmenge kann die Sachlage jedoch, wie das obige Beispiel zeigt, klären.

Dieser Befund führt zur Frage, ob der Miteinbezug weiterer Faktoren in die Kausaluntersuchung im Falle mehrdeutiger Zwischenergebnisse *immer* zu einer Klärung führt oder ob auf diesem Weg *nur in günstigen Fällen* wie dem obigen Beispiel eine eindeutige Identifikation kausaler Zusammenhänge möglich wird. Die Antwort auf diese Frage hängt davon ab, ob verschiedene Kausalstrukturen stets verschiedene Koinzidenzgruppen generieren oder nicht. Gilt mithin der im letzten Abschnitt zur Diskussion gestellte Satz (P), so wird eine Expansion der betrachteten Faktorenmenge früher oder später immer einen eindeutigen Kausalschluss ermöglichen. Wir sind damit wieder bei der Frage nach der Gültigkeit von (P) angelangt. Dieser Frage wollen wir uns im nächsten Abschnitt zuwenden.

✍ ÜBUNG: *Koinzidenzanalyse*

4.3 Kettenproblem

4.3.1 Unterschiedliche Kausalstrukturen, eine Koinzidenzgruppe

Gilt (P), so sind Kausalstrukturen beliebiger Komplexität über die Klasse an Koinzidenzen, die mit ihnen verträglich sind, identifizierbar. Jeder kausale Zusammenhang würde dann hinsichtlich der Variierbarkeit der in ihn involvierten Faktoren etwas anderes und damit etwas für ihn Charakteristisches festlegen. Jeder Kausalzusammenhang würde das Verhalten seiner Faktoren in einzigartiger Weise regulieren. Koinzidenzgruppen könnten unter diesen Voraussetzungen als Identifikationskriterien für kausale Strukturen genutzt werden.

Wie man zur Prüfung der Gültigkeit von (P) vorzugehen hat, ist klar: Man suche zwei oder mehr unterschiedliche Kausalstrukturen, die hinsichtlich ihrer Koinzidenzgruppe nicht differieren. Wird man fündig, so ist (P) falsch, andernfalls wird der Satz bestätigt.

Das Resultat dieser Suche kann an dieser Stelle vorweggenommen werden: Es existieren tatsächlich unterschiedliche kausale Zusammenhänge mit identischen Koinzidenzgruppen. Der Satz (P) gilt also nicht. Abbildung XII.5 etwa zeigt zwei mit Hilfe von Variablen vollständig explizierte kausale Strukturen, die sich in kausaler Hinsicht unterscheiden – Graph (h) stellt eine Kette, Graph (i) ein Epiphänomen dar –, die jedoch ein und dieselbe Koinzidenzgruppe generieren, d.h. das Verhalten der in ihnen enthaltenen Faktoren in identischer Weise regulieren.

Um zu beweisen, dass die Koinzidenzgruppen der Graphen (h) und (i) wirklich identisch sind, könnte man sämtliche logisch möglichen Kombinationen der 7 in diese Graphen involvierten Faktoren bzw. Variablen durchgehen und zeigen, dass

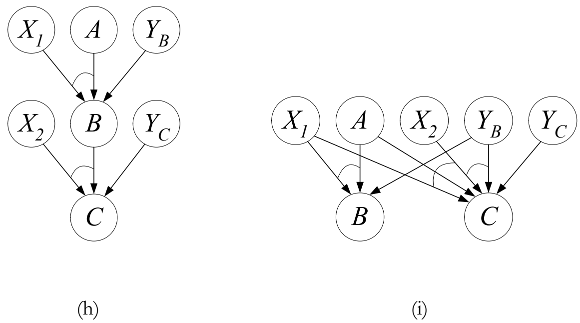


Abb. XII.5: Zwei mit Hilfe von Variablen vollständig explizierte komplexe Kausalstrukturen mit identischer Koinzidenzgruppe.

eine beliebige dieser $2^7 = 128$ Koinzidenzen genau dann mit einem der beiden Graphen verträglich ist, wenn sie es auch mit dem anderen ist. Zumal jedoch die Auflistung von 128 Koinzidenzen wie schon im Fall der Graphen (a) bis (e) aus Platzgründen hier nicht möglich ist und davon abgesehen auch nicht übersichtlich wäre, werden wir im Folgenden einen indirekten Beweis für die Identität der Koinzidenzgruppen von (h) und (i) führen. Dazu werden wir die beiden Graphen zunächst als Minimale Theorien wiedergeben und anschliessend zeigen, dass die entsprechenden Minimalen Theorien *mt*-äquivalent sind.

Die Minimalen Theorien, die den Graphen (h) bzw. (i) entsprechen, sind:

$$(AX_1 \vee Y_B \Rightarrow B) \,\&\, (BX_2 \vee Y_C \Rightarrow C) \qquad (MT_h)$$

$$(AX_1 \vee Y_B \Rightarrow B) \,\&\, (AX_1X_2 \vee Y_BX_2 \vee Y_C \Rightarrow C) \qquad (MT_i)$$

Folgende Überlegung zeigt, dass diese beiden komplexen Minimalen Theorien *mt*-äquivalent sind. Sie bestehen aus zwei konjunktiv verknüpften einfachen Minimalen Theorien, deren erste jeweils identisch sind. Diese erste Minimale Theorie bzw. das erste Konjunkt von MT_h und MT_i behauptet:

(Q) Immer wenn $AX_1 \vee Y_B$ gegeben ist, tritt eine Instanz von B auf, und immer wenn B gegeben ist, wird $AX_1 \vee Y_B$ instantiiert.

Klar ist, dass jede logisch mögliche Koinzidenz in der hier betrachteten Faktorenmenge, die unverträglich ist mit (Q), sowohl mit MT_h wie MT_i unverträglich ist, zumal beide (Q) behaupten. Eine Koinzidenz K, die eine Differenz der Koinzidenzgruppen von MT_h und MT_i etablieren könnte, muss deshalb mit dem zweiten Konjunkt von MT_h oder MT_i verträglich sein, während sie dies mit dem zweiten Konjunkt der jeweils anderen Minimalen Theorie nicht ist. Eine solche Koinzidenz K müsste eine der folgenden Bedingungen erfüllen:

- in K ist $BX_2 \vee Y_C$ nicht instantiiert, aber C und $AX_1X_2 \vee Y_BX_2 \vee Y_C$,

- in K ist $BX_2 \vee Y_C$, aber weder C noch $AX_1X_2 \vee Y_BX_2 \vee Y_C$ instantiiert,
- in K ist $AX_1X_2 \vee Y_BX_2 \vee Y_C$ nicht instantiiert, aber C und $BX_2 \vee Y_C$,
- in K ist $AX_1X_2 \vee Y_BX_2 \vee Y_C$, aber weder C noch $BX_2 \vee Y_C$ instantiiert.

Doch jede Koinzidenz, die eine dieser Bedingungen erfüllt, verletzt (Q) und ist damit sowohl mit MT_h wie auch mit MT_i unverträglich. Denn aus (Q) folgt, dass immer wenn ein Disjunkt von $AX_1X_2 \vee Y_BX_2 \vee Y_C$ gegeben ist, auch eine Instanz von $BX_2 \vee Y_C$ auftritt, und immer wenn ein Disjunkt von $BX_2 \vee Y_C$ instantiiert ist, auch eines von $AX_1X_2 \vee Y_BX_2 \vee Y_C$ gegeben ist. Eine Koinzidenz, die nur mit einer der beiden Minimalen Theorien verträglich bzw. unverträglich ist, kann es mithin nicht geben. Folglich sind MT_h und MT_i *mt*-äquivalent. Egal, welche Koinzidenz man betrachtet, sie ist entweder mit beiden Minimalen Theorien verträglich oder mit keiner.

Diese Argumentation lässt sich in ihren wesentlichen Zügen auch an den Graphen (h) und (i) nachvollziehen. Die zweite Ebene von (h) und der linke Teilgraph von (i) sind identisch. Damit eine Koinzidenz eine Differenz zwischen den beiden Graphen konstituieren könnte, müsste sie entweder mit der ersten Ebene von (h) verträglich und mit dem rechten Teilgraphen von (i) unverträglich oder, umgekehrt, mit der ersten Ebene von (h) unverträglich und dem rechten Teilgraphen von (i) verträglich sein. Doch jede Koinzidenz, welche diese Bedingung erfüllt, ist sowohl mit der zweiten Ebene von (h) als auch mit dem linken Teilgraphen von (i) und folglich mit beiden Kausalstrukturen als Ganzen unverträglich. Die durch die Graphen (h) und (i) dargestellten kausalen Zusammenhänge haben damit dieselbe Koinzidenzgruppe.

Obwohl die beiden Graphen das Verhalten der in ihnen enthaltenen Faktoren übereinstimmend regulieren, unterscheiden sie sich in kausaler Hinsicht. (h) bzw. MT_h legen fest, dass A indirekt kausal relevant für C ist, während derselbe Faktor A von (i) bzw. MT_i direkte kausale Relevanz für C zugesprochen erhält. Ferner ist in (h) B kausal relevant für C, in (i) dagegen nicht. (h) beschreibt eine kausale Verkettung, (i) ein Epiphänomen. Doch all diese markanten Unterschiede in der kausalen Strukturierung wirken sich in keiner Weise auf das Verhalten der involvierten Faktoren aus. Eine beliebige Koinzidenz ist stets entweder mit (h) und (i) zugleich oder mit keinem von beiden verträglich.

Damit aber noch nicht genug. (h) und (i) sind nicht die einzigen Kausalstrukturen mit identischen Koinzidenzgruppen. Zu jedem Kausalgraphen, der 2 Ebenen umfasst, lässt sich nach folgendem Verfahren ein Graph mit nur einer Ebene konstruieren derart, dass die beiden Graphen übereinstimmende Koinzidenzgruppen aufweisen.

(1) Trenne die beiden Ebenen bei ihren gemeinsamen Knoten voneinander ab.[18]

[18] Zur hier verwendeten graphentheoretischen Terminologie vgl. Kapitel III, Abschnitt 3.1.

(2) Entferne aus der ersten Ebene diejenigen Knoten, die zugleich Endknoten der zweiten Ebene sind, samt der von ihnen ausgehenden Pfade.
(3) Verbinde die Anfangsknoten A_2 der zweiten Ebene mit den Endknoten E_1 der ersten Ebene, und zwar so, dass die ursprünglich über die Endknoten der zweiten bzw. Anfangsknoten der ersten Ebene ($\mathsf{E}_2/\mathsf{A}_1$) führenden Pfadverbindungen $\mathsf{A}_2 \longrightarrow \mathsf{E}_2/\mathsf{A}_1 \longrightarrow \mathsf{E}_1$ durch einen entsprechenden Pfad $\mathsf{A}_2 \longrightarrow \mathsf{E}_1$ ersetzt werden.
(4) Verbinde die Kanten der ersten Ebene, die ursprünglich durch einen Bogen mit einer Kante $\mathsf{E}_2/\mathsf{A}_1 \longrightarrow \mathsf{E}_1$ verbunden gewesen sind, durch einen Bogen mit jedem in Schritt (3) neu entstandenen Pfad.

Abbildung XII.6 stellt die vier Schritte dieses Verfahrens nebeneinander. Das Verfahren zur Reduktion von 2-Ebenen- auf 1-Ebenen-Graphen lässt sich rekursiv auf einen Graphen mit beliebig vielen Ebenen anwenden. Derart kann jedem Viele-Ebenen-Graphen ein 1-Ebenen-Graph mit identischer Koinzidenzgruppe gegenübergestellt werden. Abbildung XII.7 zeigt exemplarisch die Reduktion eines 3-Ebenen- auf einen 1-Ebenen-Graphen. All dies bedeutet nichts anderes, als dass jede Kausalkette reduzierbar ist auf eine epiphänomenale Struktur!

Die Epiphänomene mit einer Koinzidenzgruppe, die mit derjenigen einer Kausalkette übereinstimmt, haben eine ganz spezifische Struktur. Sie sind von der Gestalt, dass *sämtliche* Faktoren der minimal hinreichenden Bedingungen der einen Wirkung – z.B. B in Graph (i) –, auch in den minimal hinreichenden Bedingungen der anderen Wirkung – C im Fall von (i) – enthalten sind. Wir nennen zwei Faktoren nach dem Muster von B und C *miteinander verschränkt*. Faktorenverschränkungen treten natürlich nicht nur in Epiphänomenen wie (i) auf, sondern insbesondere auch in Ketten. B und C sind auch in Graph (h) verschränkt. Zwei Faktoren sind genau dann miteinander verschränkt, wenn sämtliche Teile minimal hinreichender Bedingungen des einen Faktors auch in minimal hinreichenden Bedingungen des anderen Faktors enthalten sind.

Alle Epiphänomene, die ihre Koinzidenzgruppe mit einer Kausalkette teilen, haben mindestens zwei in diesem Sinn verschränkte Wirkungen. Das heisst, ma-

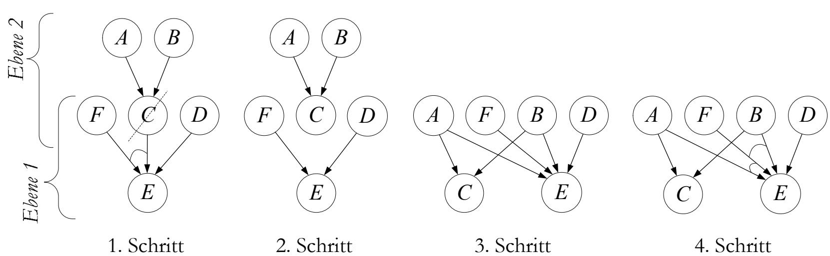
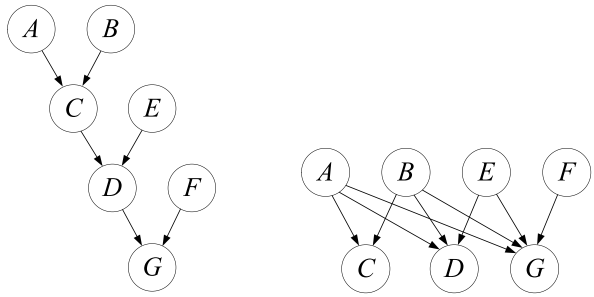


Abb. XII.6: Verfahren zur Reduktion eines 2-Ebenen-Graphen auf einen 1-Ebenen-Graphen.



(l) (m)

Abb. XII.7: Beispiel der Reduktion eines 3-Ebenen- auf einen 1-Ebenen-Graphen. Der Übersichtlichkeit halber verzichten wir hier auf die Variablen für unbekannte Faktoren und gehen davon aus, dass die Graphen (l) und (m) vollständig sind, d.h., neben den genannten Faktoren existieren keine weiteren unbekannten Ursachen.

ximal eine der Wirkungen eines solchen Epiphänomens hat Kausalfaktoren, die nicht zugleich in den minimal hinreichenden Bedingungen der anderen Wirkung enthalten sind. Zur Kennzeichnung und einfacheren Bezugnahme auf derartige epiphänomenale Strukturen werden wir fortan kurz von *verschränkten Epiphänomenen* sprechen.

> *Verschränkung:* Zwei Faktoren P und Q sind genau dann miteinander verschränkt, wenn sämtliche Faktoren minimal hinreichender Bedingungen von P auch in minimal hinreichenden Bedingungen von Q enthalten sind oder wenn sämtliche Faktoren minimal hinreichender Bedingungen von Q auch in minimal hinreichenden Bedingungen von P enthalten sind.
>
> *Verschränktes Epiphänomen:* Ein Epiphänomen heisst genau dann verschränkt, wenn seine Wirkungen miteinander verschränkt sind.

Es gibt also zu jeder Kausalkette ein verschränktes Epiphänomen mit identischer Koinzidenzgruppe und entsprechend zu jeder Minimalen Theorie, die eine Kette darstellt, eine mt-äquivalente Minimale Theorie, die ein verschränktes Epiphänomen repräsentiert. Umgekehrt hat aber Tabelle XII.1 gezeigt, dass nicht zu jedem Epiphänomen auch eine Kausalkette mit derselben Koinzidenzgruppe existiert. So lässt sich etwa das nicht verschränkte Epiphänomen (c) problemlos anhand seiner Koinzidenzgruppe von den Ketten (a) oder (b) unterscheiden. Sobald in den minimal hinreichenden Bedingungen zweier multipler Wirkungen je mindestens ein Faktor enthalten ist, der nicht Teil einer minimal hinreichenden Bedingung der anderen Wirkung ist, können die beiden Wirkungen nicht in einer Kette miteinander verhängt sein. Sämtliche dieser ‚gängigen' Epiphänomene sind über eine Analyse ihrer Koinzidenzgruppen mit Hilfe des in Kapitel IX entwickelten kausalen Schlussverfahrens identifizierbar.

Solange kausale Zusammenhänge über Koinzidenzanalysen ermittelt und nur die herkömmlichen Schlussregeln zugrunde gelegt werden, könnte indessen jeder kausale Prozess, von dem wir gängigerweise annehmen, er laufe über mehrere Ebenen, ebenso gut als verschränktes Epiphänomen modelliert werden. Das ist natürlich ein stark mit gängigen kausalen Intuitionen in Konflikt stehender Befund. Dass Ursachen und Wirkungen die Eigenschaft haben, Ketten zu bilden, gehört, wie einleitend gesagt, zu unserem alltäglichen Verständnis der Kausalrelation. Dass Koinzidenzanalysen auf der Basis der bisher entwickelten Schlussregeln keine Unterscheidung von Ketten und verschränkten Epiphänomenen ermöglichen, ist deshalb ein ernst zu nehmendes Problem. Wir nennen es das *Kettenproblem*:

> *Kettenproblem:* Tritt in einer Faktorengruppe $\mathcal{F}$ eine Menge R an Koinzidenzen auf, die mit einer Kausalkette verträglich ist, so ist R ebenfalls mit einem verschränkten Epiphänomen verträglich. Es ist auf der Basis von R und den herkömmlichen kausalen Schlussregeln kein Schluss auf eine Kausalkette oder ein Epiphänomen möglich.

✍ ÜBUNG: *Kettenproblem*

4.3.2 Kausalintuition und komplexe Kausalstrukturen

Betrachten wir die Unmöglichkeit, ausgehend von einer Menge an auftretenden Koinzidenzen auf eine Kette oder ein verschränktes Epiphänomen zu schliessen, an einem Beispiel. Gegeben sei die Faktorengruppe $\mathcal{F}_1$ bestehend aus den Faktoren A, B, C, D und E. In $\mathcal{F}_1$ treten genau die folgenden 8 Koinzidenzen auf. Wir fassen sie in der Menge R zusammen:

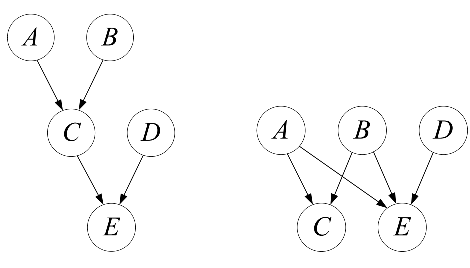
$$
\begin{array}{c}
ABCDE \\
ABC\overline{D}E \\
A\overline{B}CDE \\
A\overline{B}C\overline{D}E \\
\overline{A}BCDE \\
\overline{A}BC\overline{D}E \\
\overline{ABC}DE \\
\overline{ABCDE}
\end{array}
\qquad (\mathsf{R})
$$

Dieses Beispiel ist der Übersichtlichkeit halber insofern konstruiert, als zwischen den Faktoren dieser kleinen Koinzidenzgruppe klare und einfach identifizierbare Abhängigkeiten bestehen, die insgesamt zudem die Anforderungen an die minimale Komplexität einer durch MT analysierten Kausalstruktur erfüllen, so dass R keinen Anlass bietet, von irgendwelchen unbekannten Faktoren auszugehen. Relativ zu R gelten nämlich die folgenden Abhängigkeiten: A und B sind je minimal hinreichend für C; A, B, C und D je minimal hinreichend für E. Die disjunktive Verknüpfung von A und B entspricht einer minimal notwendigen Bedingung von C. Die notwendige Bedingung von E andererseits lässt sich nicht eindeutig minimalisieren, zumal drei der minimal hinreichenden Bedingungen von E, und zwar A, B und C ihre potentielle kausale Relevanz für E nie unabhängig voneinander unter Beweis stellen. Immer wenn A oder B gegeben sind, tritt auch C auf. R ist alles in allem also verträglich mit zwei *mt*-äquivalenten komplexen Minimalen Theorien:

$$(A \vee B \Rightarrow C) \;\&\; (C \vee D \Rightarrow E) \qquad (MT_n)$$

$$(A \vee B \Rightarrow C) \;\&\; (A \vee B \vee D \Rightarrow E) \qquad (MT_o)$$

Diesen Minimalen Theorien entsprechen der Reihe nach die beiden in Abbildung XII.8 dargestellten Graphen. MT_n und MT_o sind zwar *mt*-äquivalent, kausal dagegen widersprechen sie einander. Aus MT_n ergibt sich die kausale Relevanz von C für E, aus MT_o demgegenüber nicht. Die mit Minimalen Theorien operierende Regularitätstheorie sieht sich also in ihrer herkömmlichen Form MT angesichts von MT_n und MT_o gezwungen, C kausale Relevanz für E sowohl zuzusprechen wie nicht zuzusprechen. Soll am Grundsatz der Definition kausaler Relevanz von Ereignistypen über deren Mitgliedschaft in Minimalen Theorien festgehalten werden, so ist klar, dass entweder MT_n oder MT_o aus der Klasse der Minimalen Theorien ausgeschieden werden muss. Damit untrennbar verbunden ist die Frage nach



(n) (o)

Abb. XII.8: Eine Kette und ein Epiphänomen mit identischer Koinzidenzgruppe, die beide den Faktoren in $\mathcal{F}_1$ zugrunde liegen könnten.

den Regeln, aufgrund derer angesichts von R auf MT_n oder MT_o bzw. auf die Graphen (n) oder (o) zu schliessen sei. Diese Frage ist nicht zuletzt deshalb vordringlich, weil unsere Kausalintuition je nach Interpretation der Faktoren in $\mathcal{F}_1$ ohne weiteres eine eindeutige Entscheidung zwischen (n) und (o) zu treffen in der Lage ist.

Interpretation (I): Der Motor eines Autos könne genau auf zweierlei Art in Gang gesetzt werden – entweder durch Drehen des Zündschlosses oder durch Kurzschliessen der Zündkabel. Immer wenn der Motor läuft, setze sich der betreffende Wagen in Bewegung. Der Wagen kann auch durch alternative Faktoren wie Abschleppen oder Anstossen, mithin auch durch äussere Krafteinwirkung bewegt werden:

A = Drehen des Zündschlosses
B = Kurzschliessen der Zündkabel
C = laufender Motor
D = äusserer Bewegungsimpuls
E = Fortbewegung des Wagens.

Interpretation (I) legt eine Modellierung des zugrunde liegenden Prozesses nach dem Muster von (n) nahe. Vorausgesetzt also, man interpretiert die Faktoren der Koinzidenzen in R nach dieser Legende, so begreift unsere kausale Intuition den unterliegenden Prozess als Kette.

Interpretation (II): In einer Stadt gebe es genau zwei Elektrizitätswerke. Die Stromversorgung des in dieser Stadt befindlichen Hauses r sei vollständig abhängig von der Stromproduktion in mindestens einem dieser Kraftwerke. Ein anderes Haus s dagegen habe im Keller für den Notfall einen Generator stehen. Immer wenn eines der Elektrizitätswerke Strom produziere, seien r und s mit Strom versorgt:

A = Stromproduktion durch das Elektrizitätswerk 1
B = Stromproduktion durch das Elektrizitätswerk 2
C = Stromversorgung des Hauses r
D = Stromproduktion durch den Generator in s
E = Stromversorgung des Hauses s.

Vor dem Hintergrund von Interpretation (II) schliesst unsere Kausalintuition auf den Graphen (o) und damit auf das verschränkte Epiphänomen.

Intuitiv ist man zwar felsenfest davon überzeugt, dass der vom Zündschloss zur Fortbewegung des Wagens führende Kausalzusammenhang die Form einer Kette und der Kausalzusammenhang hinter der Stromversorgung der Häuser r und s die Form eines Epiphänomens haben, einen durch die bisherigen Schlussregeln abgesicherten Nachweis für diese Urteile ist vermittels einer Analyse der Koinzidenzen in R aber nicht zu führen. Wie also kommt abhängig von einer jeweiligen Interpretation der Faktoren unsere klare Intuition zustande?

4.4 Schliessen auf Ketten und die begrifflichen Grundlagen von MT

Das Kettenproblem betrifft sowohl die Regeln des kausalen Schliessens wie auch die in Kapitel V entwickelte Begrifflichkeit einer mit Minimalen Theorien operierenden Regularitätstheorie. Zum einen erfordert ein Schluss auf Ketten, zumal das bisherige Schlussverfahren keinen Unterschied machen kann zwischen Ketten und verschränkten Epiphänomen, zusätzliche Schlussregeln. Zum anderen verlangt der Umstand, dass es offenbar *mt*-äquivalente Minimale Theorien gibt, die in kausaler Hinsicht differieren, nach einer Anpassung der Definition kausaler Relevanz über die Mitgliedschaft von Faktoren in Minimalen Theorien. Das begriffliche Fundament unserer Kausaltheorie darf uns nicht wie im Fall von MT_n und MT_o dazu zwingen, einem Faktor (C) kausale Relevanz für eine Wirkung (E) zuzusprechen und nicht zuzusprechen. Wir werden diese Anpassungen von MT in der Folge gestaffelt und in der obigen Reihenfolge behandeln.

4.4.1 Kausale Interpretation von Faktorenverschränkungen

Mit den Ketten entzieht sich nicht irgendeine unwichtige und selten auftretende kausale Strukturierung der Analysierbarkeit durch unsere Regeln kausalen Schliessens, sondern eine der fundamentalsten Kausalstrukturen überhaupt. Eine theoretische Analyse der Kausalrelation sowie ein Verfahren kausalen Schliessens können erst dann vorbehaltlos als geglückt gelten, wenn dieses Manko behoben ist. In der Folge sollen deshalb die in Kapitel IX entwickelten Schlussregeln derart ergänzt werden, dass ein Schluss auf Ketten möglich wird.

Betrachten wir zur Entwicklung einer solchen neuen Schlussregel nochmals die Interpretationen (I) und (II) der Faktoren in $\mathcal{F}_1$. Beide Interpretationen vereinfachen den jeweiligen Kausalprozess erheblich. Unsere Kausalintuition beurteilt die beiden Fälle indessen nicht vor dem Hintergrund der Faktorengruppe $\mathcal{F}_1$, sondern einer passend zur jeweiligen Interpretation expandierten Faktorengruppe. Hieraus ergibt sich, wie nun zu zeigen sein wird, im Wesentlichen der Grund, weshalb wir im Fall von Interpretation (I) ohne Zögern auf eine Kette, im Fall von Interpretation (II) ebenso eindeutig auf ein Epiphänomen schliessen. Wir wissen, dass der elektrische Impuls vom Zündschloss über geeignete Verkabelungen zum Motor übertragen wird, welcher darauf anspringt und vermittels der über die Achsen auf die Räder transferierten Bewegungsenergie den Wagen anrollen lässt. Jede in $\mathcal{F}_1$ noch nicht erfasste weitere Alternativursache, die durch einen entsprechenden elektrischen Impuls, die Zündkerze zum Feuern veranlasst, setzt den Wagen auf diesem kausalen Weg in Bewegung. Die Verschränkung von C und E bleibt bei all diesen möglichen Erweiterungen von $\mathcal{F}_1$ – interpretiert gemäss (I) – erhalten. Andererseits entscheidet sich unsere Kausalintuition vor dem Hintergrund von Interpretation (II) deshalb für ein Epiphänomen, weil wir wissen, dass man Generatoren oder Batterien in beliebigen Häusern installieren und so jedes Haus unabhängig von jedem anderen Haus mit Strom versorgen kann. Unsere Intuition geht mithin im Fall von Interpretation (II) automatisch von einer um mindestens eine weitere Alternativursache von C ergänzten Faktorengruppe aus, und zwar von einer Faktorengruppe, in der die Verschränkung von C und E aufgelöst ist. Eine solche Erweiterung von $\mathcal{F}_1$ liefert ein eindeutig identifizierbares Epiphänomen.

Vor dem Hintergrund von Interpretation (I) expandieren wir $\mathcal{F}_1$ also beispielsweise um die Faktoren:

G = Starten des Motors mit Überbrückungskabeln
H = Starten des Motors mit einem Akku-Startgerät
I = Übertragung des Zündimpulses auf die Zündkerze.

Wir nennen die derart erweiterte Faktorengruppe $\mathcal{F}_2$. Demgegenüber ergänzt eine Expansion von $\mathcal{F}_1$ interpretiert gemäss Interpretation (II) etwa den folgenden Faktor:

L = Stromproduktion durch einen Generator in r.

Die Expansion der nach Vorgabe von Interpretation (II) gedeuteten Faktorengruppe $\mathcal{F}_1$ um L heisse $\mathcal{F}_3$.

Die Expansionen von $\mathcal{F}_1$ zu $\mathcal{F}_2$ bzw. $\mathcal{F}_3$ unterscheiden sich in einem wichtigen Punkt: Die Expansion von $\mathcal{F}_1$ interpretiert nach Interpretation (I) ist *strukturerhaltend*, wohingegen dasselbe für Interpretation (II) nicht gilt. Die fürs Kettenproblem entscheidende strukturelle Eigenschaft der in den Graphen (n) und (o) dargestellten Kausalstrukturen ist die Verschränkung von C und E. Diese Verschränkung bleibt bei der Expansion von $\mathcal{F}_1$ zu $\mathcal{F}_2$ erhalten. Dies gilt nicht nur für die Expansion von $\mathcal{F}_1$ um die Faktoren G, H und I. *Jeder* neu in die Struktur (n) eingeführte Faktor, der in einer minimal hinreichenden Bedingung von C enthalten ist, ist auch Teil einer minimal hinreichenden Bedingung von E. Wird $\mathcal{F}_1$, interpretiert gemäss (II), hingegen zu $\mathcal{F}_3$ expandiert, löst sich die Verschränkung von C und E auf. Wir interpretieren den Prozess, welcher der Stromversorgung der Häuser r und s zugrunde liegt, deshalb als Epiphänomen, weil (o) derart erweiterbar ist, dass sowohl C wie auch E mindestens eine minimal hinreichende Bedingung aufweisen, deren Teile nicht alle auch in den minimal hinreichenden Bedingungen des jeweils anderen Faktors enthalten sind. Gäbe es keine minimal hinreichenden Bedingungen der Stromversorgung von Haus r, deren Teile nicht alle ebenfalls in minimal hinreichenden Bedingungen der Stromversorgung im Nachbarhaus s enthalten sind, hätten wir auch relativ zu Interpretation (II) keinen Anlass, die R generierende Kausalstruktur als Epiphänomen zu begreifen.

Dieser Unterschied hinsichtlich der Expandierbarkeit von (n) und (o) unter Erhaltung der Verschränkung von C und E liefert uns zunächst das gesuchte Kriterium, das Ketten und Epiphänomene voneinander unterscheidet und aufbauend darauf anschliessend eine Regel zur kausalen Interpretation von Faktorenverschränkungen. Werden zusätzliche Faktoren in eine Kausalkette integriert, so werden Faktorenverschränkungen prinzipiell nie aufgelöst. Das heisst, sind in einer Kausalkette K zwei Faktoren P und Q miteinander verschränkt, so sind sie dies auch in *jeder* um beliebige weitere Faktoren expandierten Kette K'. Dies ist der Grund, weshalb unsere Kausalintuition angesichts von Interpretation (I) auf eine Kette schliesst. Sind dagegen zwei Faktoren P und Q in einem Epiphänomen E miteinander verschränkt, so sind sie dies *nicht* in jedem um weitere Faktoren expandierten Epiphänomen E'. Der Einbezug zusätzlicher Faktoren in epiphänomenale Strukturen führt früher oder später zur Auflösung von Verschränkungen. Deshalb entscheidet sich unsere Kausalintuition im Fall von Interpretation (II) für ein Epiphänomen.

Die Erhaltung sämtlicher Verschränkungen unter jeder Expansion der analysierten Faktorengruppe ist das charakteristische Merkmal von Kausalketten. In jeder Kausalkette sind mindestens zwei Faktoren miteinander verschränkt. Auch bei Epiphänomenen können, wie Graph (o) zeigt, Verschränkungen auftreten. Doch sind diese im Fall von Epiphänomenen stets Ausdruck einer Analyse zu kleiner Faktorengruppen. Bleiben Verschränkungen bei jeder Expansion einer analysierten Faktorengruppe erhalten, handelt es sich beim unterliegenden Kausalzusammenhang um eine Kette, andernfalls um ein Epiphänomen.

Identifikationskriterium für Kausalketten (IKK): Die kausale Struktur, die das Verhalten der Faktoren in einer Faktorengruppe $\mathcal{F}$ reguliert, ist genau dann eine Kausalkette, wenn es in $\mathcal{F}$ mindestens zwei verschränkte Faktoren gibt, deren Verschränkung unter jeder Expansion von $\mathcal{F}$ erhalten bleibt.

Auf der Basis von IKK lässt sich nun eine Regel entwickeln, die den Umgang mit Faktorenverschränkungen systematisiert. Man wird natürlich bei der kausalen Analyse einer Faktorengruppe $\mathcal{F}$ nie sämtliche Expansionsmöglichkeiten von $\mathcal{F}$ durchgehen können. Kausal analysierte Faktorengruppen sind im Normalfall unvollständig. Deshalb lässt sich IKK im Fall verschränkter Faktoren nicht direkt als Entscheidungskriterium veranschlagen. Trotzdem legt IKK die folgende Entscheidungsregel nahe: Schliesse angesichts verschränkter Faktoren solange auf verkettete Strukturen, als diese Verschränkungen nicht durch Expansion der untersuchten Faktorengruppe aufgelöst worden sind. Das heisst, sind zwei Faktoren P und Q in $\mathcal{F}$ derart miteinander verschränkt, dass alle in minimal hinreichenden Bedingungen von P enthaltenen Faktoren auch in minimal hinreichenden Bedingungen von Q enthalten sind, so schliesse auf die kausale Relevanz von P für Q. Dieser Schluss ist natürlich stets auf die jeweiligen Faktorengruppe $\mathcal{F}$ zu relativieren. Löst sich die Verschränkung von P und Q bei fortschreitender Expansion von $\mathcal{F}$ auf, so wird sich der anfängliche Schluss auf die kausale Relevanz von P für Q als falsch herausstellen.

Gemäss IKK zeichnet sich jede Kausalkette durch mindestens zwei verschränkte Faktoren aus. Zumal das Kettenproblem nur entsteht, wenn eine Menge kausal analysierter Koinzidenzen verträglich ist mit einer kettenförmigen Struktur, sind in jede konkrete Instanz des Kettenproblems mindestens zwei verschränkte Faktoren involviert. Die oben formulierte Entscheidungsregel verlangt, diese Verschränkung solange kausal zu interpretieren, als sie nicht durch Expansion der untersuchten Faktorengruppe aufgelöst worden ist. Oder anders gewendet: Sie gibt dem Schluss auf die Kette solange den Vorzug, als ein gegebenenfalls zugrunde liegendes Epiphänomen nicht eindeutig als gängiges Epiphänomen identifizierbar ist.

> *Regel zur kausalen Interpretation von Faktorenverschränkungen* (RIF): Sind in einer kausal analysierten Faktorengruppe zwei Faktoren P und Q derart miteinander verschränkt, dass alle in minimal hinreichenden Bedingungen von P enthaltenen Faktoren auch in minimal hinreichenden Bedingungen von Q enthalten sind, so interpretiere nur solche minimal notwendigen Bedingungen von Q kausal, die P als kausal relevant für Q ausweisen. Oder kurz: Faktorenverschränkungen sind kausal zu interpretieren.

RIF verlangt im Falle von Instanzen des Kettenproblems stets einen Schluss auf Kausalketten. Gemäss RIF erhält der Schluss auf (n) in Anbetracht von R den Vorzug gegenüber dem Schluss auf (o), dies indes nur solange, als nicht mindestens ein Faktor gefunden worden ist, der in einer minimal hinreichenden Bedingung von C, nicht aber in einer minimal hinreichenden Bedingung von E enthalten ist. Sobald die Verschränkung von C und E durch Expansion der untersuchten Faktorengruppe aufgelöst ist, greifen die in Kapitel IX formulierten Regeln kausalen Schliessens für Kausalstrukturen, die nur eine Ebene umfassen. Diese Regeln verhindern eine kausale Interpretation des Verhältnisses zwischen nicht-verschränkten Faktoren.

Rechtfertigen lässt sich RIF nicht nur über IKK, sondern auch über gängige Einfachheitsargumente. Die Reduktion eines Viele- auf einen 1-Ebenen-Graphen geht einher mit einer erheblichen Komplexitätszunahme der zugrunde gelegten kausalen Struktur. Bei der Reduktion der in Abbildung XII.7 dargestellten Kette (l) auf das Epiphänomen (m) beispielsweise tritt an die Stelle der einen Kante von D nach G eine Vielzahl von Kanten, und zwar eine ausgehend von jedem kausal relevanten Faktor von D und mündend in G. (l) behauptet wesentlich weniger direkte kausale Relevanzen. Um eine Prognose bezüglich des Auftretens von G zu stellen, reicht Information über das Gegebensein von D aus. Es ist nicht erforderlich A, B, C oder E mitzuberücksichtigen. Das Wissen um kausale Abhängigkeiten zwischen einzelnen Faktoren dient dazu, deren Verhalten zu erklären oder prognostizieren. Solches Wissen sollte möglichst einfach organisiert sein. Indem RIF Faktorenverschränkungen kausal interpretiert und damit den Ketten stets den Vorzug gegenüber verschränkten Epiphänomenen gibt, trägt RIF der Grundidee einer möglichst einfachen Organisation kausalen Wissens Rechnung. RIF zieht von zwei gleichermassen mit einer Koinzidenzgruppe verträglichen Kausalstrukturen die einfachere der komplexeren vor.

4.4.2 Präzisierung der begrifflichen Grundlagen von MT

Die Grundidee von MT besteht in einer Definition kausaler Relevanz über die Mitgliedschaft von Faktoren in Minimalen Theorien und damit in einer Rückführung kausaler Relevanz auf eine 'expansionsresistente' doppelkonditionale Abhängigkeit zwischen Ursachen- und zugehörigen Wirkungstypen. Besteht zwischen einer Gruppe von Faktoren eine solche doppelkonditionale Abhängigkeit, so heisst das nichts anderes, als dass von allen logisch möglichen Koinzidenzen dieser Faktoren bloss eine echte Teilmenge empirisch möglich ist. Die von MT verfolgte Definitionsstrategie kann damit nur dann zu einem wohldefinierten Begriff kausaler Relevanz führen, wenn *mt*-äquivalente Minimale Theorien, d.h. Minimale Theorie, die mit denselben Koinzidenzen verträglich sind, auch dieselben kausalen Relevanzen festlegen. Es darf der Fall nicht eintreten, dass ein Faktor von MT zugleich kausale Relevanz für eine Wirkung zugesprochen und nicht zugesprochen erhält. Doch diese Bedingung ist, wie wir gesehen haben, durch MT_n und MT_o verletzt. Das Kettenproblem bedingt mithin auch eine Anpassung der Begrifflichkeit von MT.

Ziel einer solchen Begriffsrevision muss es sein, eine von zwei kausal nicht äquivalenten *mt*-äquivalenten Minimalen Theorien als nicht kausal interpretierbar auszuscheiden. Es ist klar, welcher der Ausdrücke MT_n und MT_o gemäss RIF nicht kausal interpretiert werden darf: MT_o. Um weiter am Grundsatz festhalten zu können, wonach kausale Relevanz über die Mitgliedschaft in Minimalen Theorien zu definieren sei, wollen wir den oben eingeführten Begriff einer komplexen Minimalen Theorie an dieser Stelle derart modifizieren, dass MT_o nicht mehr darunter fällt.

Einfache und komplexe Minimale Theorien (II) (EKM):

(i) Ein Doppelkonditional mit einer minimal notwendigen Disjunktion minimal hinreichender Bedingungen im Antezedens und einem einzelnen Faktor im Konsequens derart, dass ein beliebiger Faktor im Antezedens bei jeder Erweiterung dieses Doppelkonditionals um weitere Faktoren darin enthalten bleibt, ist eine *einfache* Minimale Theorie.

(ii) Jede einfache Minimale Theorie ist eine Minimale Theorie (MT).

(iii) Eine Konjunktion aus zwei Minimalen Theorien MT_x und MT_y ist eine Minimale Theorie gdw.

(a) mindestens ein Faktor sowohl in MT_x als auch in MT_y enthalten ist,
(b) MT_x und MT_y kein identisches Konsequens haben und
(c) für jedes i, $1 \leq i < n$, in einer Reihe verschränkter Faktoren $Z_1, \ldots, Z_n$, $n \geq 2$, gilt: Z_i ist im Antezedens der einfachen Minimalen Theorie von Z_{i+1} enthalten.

(iv) Minimale Theorien, die nicht einfach sind, sind *komplex*.

Bedingung (iii.c) von EKM scheidet MT_o als Minimale Theorie aus, zumal C und E in R verschränkt sind, in MT_o jedoch keiner von beiden in der einfachen Minimalen Theorie des anderen auftritt. Damit kann dem Grundsatz entsprochen werden, kausale Relevanz von Faktoren über deren Mitgliedschaft in Minimalen Theorien zu definieren. Vor diesem begrifflichen Hintergrund ergeben sich folgende Präzisierungen der in Kapitel V eingeführten Begriffe kausaler Relevanz:

Direkte Kausale Relevanz und Minimale Theorien (MT'$_d$): Ein Faktor A ist genau dann direkt kausal relevant für einen Faktor B, wenn A im Antezedens der *einfachen* Minimalen Theorie von B enthalten ist.

Indirekte kausale Relevanz und Minimale Theorien (MT'$_i$): Ein Faktor A ist genau dann indirekt kausal relevant für einen Faktor B, wenn es eine Reihe R von Faktoren $Z_1, Z_2, \ldots, Z_n$, $n \geq 3$, gibt, so dass

(a) $A = Z_1$ und $B = Z_n$,
(b) für jedes i, $1 \leq i < n$, gilt: Z_i ist im Antezedens der einfachen Minimalen Theorie von Z_{i+1} enthalten,
(c) die Konjunktion der einfachen Minimalen Theorien von Z_2 bis Z_n eine komplexe Minimale Theorie bildet.

Kausale Relevanz und Minimale Theorien (MT’): Ein Faktor A ist genau dann kausal relevant für einen Faktor B, wenn A entweder im Sinne von MT’$_d$ *direkt* oder im Sinne von MT’$_i$ *indirekt* kausal relevant für B ist.

Damit ist IKK und RIF auch begrifflich Rechnung getragen. Faktorenverschränkungen, die unter jeder Erweiterung der untersuchten Faktorengruppe erhalten bleiben, sind kausal zu interpretieren. Sind die Faktoren A und B derart miteinander verschränkt, dass alle Teile minimal hinreichender Bedingungen von A auch in minimal hinreichenden Bedingungen von B enthalten sind, so ist A (direkt oder indirekt) kausal relevant für B und sämtliche Faktoren, die direkt kausal relevant sind für A, sind indirekt kausal relevant für B. Die Unklarheiten und Mehrdeutigkeiten, die sich aus dem Kettenproblem ergaben, sind somit beseitigt. Koinzidenzgruppen nach dem Muster von R, deren Verschränkungen unter jeder Erweiterung der Faktorengruppe erhalten bleiben, rühren von verketteten Kausalstrukturen her und nicht von epiphänomenalen.

Fassen wir die Befunde unserer Diskussion des Kettenproblems zusammen. Die Anwendung der in Kapitel IX entwickelten kausalen Schlussregeln auf Kausalstrukturen, die mehr als eine Ebene umfassen, bedingt zunächst eine Preisgabe der Unabhängigkeitsannahme UPK. Damit jedoch handelt man sich das Kettenproblem ein. Das heisst, setzt man nicht voraus, dass Faktoren, die auf ihre kausale Relevanz für eine jeweilige Wirkung hin untersucht werden, kausal unabhängig voneinander sind, legen die bisherigen Schlussregeln angesichts bestimmter Koinzidenzgruppen mehrdeutige Kausaldiagnosen nahe. Jede Kette könnte auch als verschränktes Epiphänomen interpretiert werden. Um hier Abhilfe zu schaffen, müssen die Schlussregeln um eine neue Regel, und zwar RIF, erweitert werden. UPK kann mithin nicht ersatzlos gestrichen werden. Ferner bedingt das Kettenproblem eine Anpassung der begrifflichen Grundlagen von MT. Die Aufrechterhaltung des Grundsatzes, wonach kausale Relevanz über die Mitgliedschaft von Faktoren in Minimalen Theorien definiert werden soll, erfordert eine Ausscheidung eines von zwei Ausdrücken nach dem Muster von MT_n und MT_o aus der Klasse der Minimalen Theorien. EKM leistet dies im Sinne von RIF.

4.5 Kausale Interpretation von minimal notwendigen Bedingungen

Abschnitt 4.3.2 hat darauf hingewiesen, dass man das Kettenproblem auch als Problem der Minimalisierung notwendiger Bedingungen begreifen kann. Die Faktoren A, B und C im Beispiel von Abschnitt 4.3.2 sind alle minimal hinreichend für E. A und B stellen eine mögliche kausale Relevanz für E indes nie unabhängig von C unter Beweis. Bei $C \vee D$ und $A \vee B \vee D$ handelt es sich je um minimal notwendige Bedingungen von E. Es können aber nicht beide dieser Bedingungen zugleich kausal interpretiert werden, denn im einen Fall wird der kausale Prozess, welcher der Entstehung von E unterliegt, als Kette verstanden, im anderen Fall als Epiphänomen und ein kausaler Prozess kann nicht zugleich verkettet und epiphänomenal strukturiert sein. Einen Entscheid, welche der beiden minimal notwendigen Bedingungen von E nun kausal zu interpretieren sei, fällt RIF bzw. MT'. Diejenige minimal notwendige Bedingung soll kausal interpretiert werden, in welcher der mit E verschränkte Faktor C enthalten ist. Das ist in diesem Fall $C \vee D$.

Dieses Beispiel macht auf einen interessanten Umstand aufmerksam: Wirkungen haben manchmal mehrere minimal notwendige Bedingungen, von denen nicht jede kausal interpretiert werden kann, weil sie sich unter Umständen in kausaler Hinsicht widersprechen! Die Minimalisierung notwendiger Bedingungen zeitigt bisweilen keine eindeutigen Resultate. Zwar gibt es für jede Wirkung mindestens eine minimal notwendige Bedingung, aber es gibt nicht unbedingt für jede Wirkung *genau* eine minimal notwendige Bedingung. Das Kettenproblem hat deutlich werden lassen, dass für jede Wirkung, die am Ende einer Kausalkette angesiedelt ist, mindestens zwei Doppelkonditionale mit minimal notwendigen Bedingungen im Antezedens existieren, die, obwohl mt-äquivalent, in kausaler Hinsicht nicht äquivalent sind.

Wirkungen, die am Ende kettenförmiger Prozesse stehen, sind nicht die einzigen Faktoren, deren notwendige Bedingungen nicht eindeutig minimalisierbar sind. Es gibt auch Wirkungen, die im Konsequens mehrerer mt-äquivalenter *einfacher* Minimaler Theorien stehen. Kim hat in Anlehnung an Quine einen solchen Fall konstruiert.[19] Eine Wirkung W habe die folgenden vier minimal hinreichenden Bedingungen: $A\overline{B}$, $\overline{A}B$, $A\overline{C}$ und $B\overline{C}$. Deren Disjunktion ist keine minimal notwendige Bedingung bzw.

$$A\overline{B} \vee \overline{A}B \vee A\overline{C} \vee B\overline{C} \Rightarrow W \tag{V}$$

ist keine Minimale Theorie von W. Dies deshalb nicht, weil das Antezedens von (V) redundante Disjunkte aufweist. Man kann entweder $A\overline{C}$ oder $B\overline{C}$, nicht aber beide streichen, so dass die verbleibende Disjunktion weiterhin notwendig ist für W. Folgendes sind also beides Minimale Theorien von W:

$$A\overline{B} \vee \overline{A}B \vee A\overline{C} \Rightarrow W \tag{MT_p}$$

$$A\overline{B} \vee \overline{A}B \vee B\overline{C} \Rightarrow W \tag{MT_q}$$

MT_p und MT_q sind mt-äquivalent, identifizieren jedoch andere Faktorenbündel als komplexe Ursachen von W.

Dies ist prima facie eine mit dem Kettenproblem verwandte Schwierigkeit. Die nicht eindeutige Minimalisierbarkeit des Antezedens von (V) ergibt sich jedoch anders als im Fall von Instanzen des Kettenproblems nicht aufgrund einer kausalen Abhängigkeit mehrerer minimal hinreichender Bedingungen von W, sondern aufgrund einer logischen Abhängigkeit zwischen den Disjunkten des Antezedens von

[19] Vgl. Kim (1993), S. 67, und Quine (1959).

(V). Es gelten nämlich folgende konditionale Abhängigkeiten:

$$A\overline{C} \rightarrow B\overline{C} \vee A\overline{B} \tag{VI}$$

$$B\overline{C} \rightarrow \overline{A}B \vee A\overline{C} \tag{VII}$$

Das heisst, immer wenn $A\overline{C}$ bzw. $B\overline{C}$ gegeben sind, wird auch $B\overline{C} \vee A\overline{B}$ bzw. $\overline{A}B \vee A\overline{C}$ instantiiert. Ist damit $A\overline{C}$ oder $B\overline{C}$ gegeben, wird immer zugleich mindestens noch ein anderes Disjunkt von (V) instantiiert. Es ist infolgedessen aus *logischen* Gründen ausgeschlossen, die kausale Relevanz von $A\overline{C}$ und $B\overline{C}$ unabhängig von anderen Disjunkten zu testen. Die Frage, ob MT_p oder MT_q als Minimale Theorie von W zu gelten habe und entsprechend kausal zu interpretieren sei, ist mithin prinzipiell nicht entscheidbar. Der Umstand, dass (V) nicht eindeutig minimalisierbar ist, spiegelt die Tatsache wieder, dass aus logischen Gründen nicht entscheidbar ist, ob $A\overline{C}$ oder $B\overline{C}$ kausal relevant ist für W.

Die nicht eindeutige Minimalisierbarkeit notwendiger Bedingungen in einfachen Doppelkonditionalen ist also im Gegensatz zur nicht eindeutigen Minimalisierbarkeit notwendiger Bedingungen in komplexen Doppelkonditionalen kein Problem für MT bzw. MT'. Sie ist vielmehr Ausdruck einer aufgrund logischer Abhängigkeiten zwischen den minimal hinreichenden Bedingungen einer untersuchten Wirkung bestehenden Unmöglichkeit, in einem Kausaltest einen Entscheid zwischen zwei konkurrierenden Kausalhypothesen herbeizuführen.

4.6 Kausalanalysen und Koinzidenzgruppen

Ausgangspunkt unserer Diskussion des Kettenproblems war in Abschnitt 4.1 die Frage, ob es prinzipiell möglich sei, komplexe Kausalstrukturen über ihre Koinzidenzgruppen zu identifizieren. Voraussetzung einer solchen Identifizierbarkeit von komplexen Kausalstrukturen ist die Gültigkeit von Satz (P). Das Kettenproblem hat zunächst die Ungültigkeit von (P) und damit die Unmöglichkeit, ausgehend von blossen Koinzidenzgruppen auf kausale Zusammenhänge zu schliessen, nahegelegt. Wie ist nun die Gültigkeit von (P) vor dem Hintergrund der in Abschnitt 4.4 entwickelten Lösung des Kettenproblems zu beurteilen?

IKK stellt die durch das Kettenproblem gefährdete eindeutige Zuordnung von Koinzidenzgruppen zu komplexen Kausalstrukturen wieder her. Unter jeder Erweiterung der Faktorengruppe bestehende Verschränkungen rühren von einer kausalen Abhängigkeit der betreffenden Faktoren her. Das heisst, verschränkte Epiphänomene in einer nicht weiter expandierbaren Faktorengruppe gibt es nicht. Graph (i) in Abbildung XII.5 repräsentiert mithin *keine* kausale Struktur. Verschränkungen in epiphänomenalen Zusammenhängen sind stets Ausdruck von unvollständigen Faktorengruppen. Man kann IKK in diesem Sinn als Einschränkung hinsichtlich der Wohlgeformtheit von Kausalstrukturen lesen. Diese Einschränkung wird, wie wir gesehen haben, durch unseren intuitionsgeleiteten Umgang mit Ketten und Epiphänomenen gestützt. In Anbetracht von expansionsresistenten Faktorenverschränkungen schliesst unsere kausale Intuition auf eine Kette und nicht auf ein Epiphänomen.

Nichtsdestotrotz gilt der Satz (P) in seiner allgemeinen Form nicht. Der letzte Abschnitt hat deutlich gemacht, dass unterschiedliche kausale Zusammenhänge unter Umständen durchaus identische Koinzidenzgruppen generieren – dann nämlich, wenn zwischen minimal hinreichenden Bedingungen einer Wirkung logische Abhängigkeiten nach dem Muster von (VI) und (VII) bestehen. Implizieren also minimal hinreichende Bedingungen einer Wirkung W Disjunktionen anderer minimal hinreichender Bedingungen von W, so sind notwendige Bedingungen von W nicht eindeutig minimalisierbar und folglich die Bündel kausal relevanter Faktoren von W für MT' nicht identifizierbar. Freilich ist es in solchen Konstellationen aus logischen Gründen und damit für beliebige kausale Schlussverfahren ausgeschlossen, Kausaltests anzusetzen, welche einzelne minimal hinreichende Bedingungen unabhängig von den anderen auf ihre kausale Relevanz testen und derart die Sachlage klären könnten. Jede wie auch immer geartete Kausaltheorie muss sich in solchen Fällen einer kausalen Diagnose enthalten. Es ist ferner auch nicht vorstellbar, dass wir angesichts konkreter Beispiele, die nach Vorgabe von MT_p oder MT_q strukturiert sind, eine klare kausale Intuition entwickeln würden.

Die in in diesem Kapitel angestellten Überlegungen zur Analyse komplexer Kausalstrukturen legen hingegen die Gültigkeit folgenden Satzes nahe:

(P') Verschiedene Kausalstrukturen, für die nicht gilt, dass einzelne minimal hinreichende Bedingungen einer Wirkung eine Disjunktion anderer minimal hinreichender Bedingungen derselben Wirkung implizieren, haben verschiedene Koinzidenzgruppen.

Damit sind die wesentlichen Voraussetzungen für die Anwendung unseres kausalen Schlussverfahrens auf komplexe Kausalstrukturen geschaffen. Unter Ersetzung von UPK durch RIF lassen sich Koinzidenzgruppen zur Identifikation von von kausalen Zusammenhängen ohne logische Abhängigkeiten nach dem Muster von (VI) und (VII) nutzen.