

Fritz Klocke

Kausalität in der Produktionswissenschaft

Produktionswissenschaft und Produktionstechnik

Die *Produktionswissenschaft* ist eine erkenntnisorientierte Wissenschaft mit Anwendungsbezug. Sie stellt die wissenschaftlichen Methoden, Modelle und Systematiken für die Produktionstechnik zur Verfügung. Die Produktionswissenschaft erforscht und entwickelt nachprüfbar Vorgehensweisen zur Erzeugung neuen Wissens für die Produktionstechnik.

Die *Produktionstechnik* befasst sich mit der nachhaltigen industriellen Herstellung von materiellen und immateriellen Gütern im Lebenszyklus für einen internationalen Markt. Dies umfasst die Maschinen, Verfahren und Prozesse, Produkte, Fabriken, Menschen, die Organisation und die Logistik zum Herstellen von Gütern.

Aus diesen Definitionen leitet sich für die Produktionswissenschaft eine *wissenschaftliche, technische, wirtschaftliche und eine soziale Verantwortung* ab.

Die Produktionswissenschaften gehören zu den Ingenieurwissenschaften. In der Produktionswissenschaft arbeiten unterschiedliche Fachdisziplinen anwendungsorientiert zusammen. Beispielhaft seien Ingenieure, Physiker, Mathematiker, Informatiker, Biologen, Mediziner und Arbeitswissenschaftler genannt. Jede Wissenschaftsdisziplin hat aus dem eigenen Wissenschaftsverständnis auch eigene Abstraktionen, Interpretationen und Anwendungen des Kausalitätsbegriffs entwickelt. Dies ist der Grund, weshalb die Diskussion um eine inhaltlich gemeinschaftlich getragene Definition zur Kausalität in der Produktionswissenschaft noch nicht abgeschlossen ist.

Der folgende Beitrag soll diesen Meinungsbildungsprozess beleuchten und reflektieren, gleichzeitig aber auch zur Diskussion anregen.

Im Zusammenhang mit der Anwendung des Kausalitätsbegriffs mögen zwei Punkte wichtig sein, die sich aus dem Selbstverständnis der Produktionswissenschaft ableiten lassen:

- a) Die Produktionswissenschaft erhebt **nicht** den Anspruch, eine **exakte Wissenschaft** zu sein.
- b) Im Zentrum der wissenschaftlichen Arbeiten steht die Erforschung und Entwicklung von praktikablen Verfahren (zielorientiert, rationell und effizient), um technische, organi-

satorische und logistische Vorgänge zu konfigurieren, in ihrer Wirkung zu verstehen und allgemeingültig zu modellieren.

Der unter a) genannte Punkt des Selbstverständnisses ist für eine Kausalitätsdiskussion von besonderer Bedeutung. Unter Exaktheit soll in diesem Zusammenhang verstanden werden, dass eine **strenge Kausalität** zwischen Ursachen und Wirkungen vorliegt. Strenge Kausalität bedeutet dann, dass bei Kenntnis aller Ursachen auch alle Wirkungen eindeutig bestimmbar sind und umgekehrt. In diesem strengen Sinne kann, wahrscheinlich darf, die Produktionswissenschaft gar nicht den Anspruch erheben, exakt zu sein. Die Produktionstechnik befasst sich mit technischen Systemen, der Funktionalität technischer Systeme und dem wirtschaftlichen Betrieb technischer Systeme. Das Entscheidende ist, dass Funktionskenngößen und Bewertungskenngößen technischer Systeme immer mit **Toleranzen** versehen sind. Als Toleranz versteht man in der Produktionswissenschaft einen **Unschärfebereich**, in dem vorgegebene Eigenschaftsmerkmale oder Zielgrößen schwanken dürfen, manchmal sogar schwanken müssen. Dieses können zum Beispiel Geometrie-kenngößen an einer technischen Komponente sein, Eigenschaftswerte von Werkstoffen oder auch wirtschaftliche Kenngößen, wie Kosten oder Durchlaufzeiten. Keine Zielkenngröße eines technischen Systems kann ohne Toleranzen (Schwankungsbreiten) erzeugt bzw. bestimmt werden (philosophisch: absolute Genauigkeit). Andererseits sind in vielen Fällen Toleranzen unbedingt notwendig, um eine bestimmte Funktionalität zu gewährleisten. Hier geht es nicht um die Frage, dass Toleranzen nicht vermeidbar sind, sondern dass bestimmte Schwankungsbreiten vorgegeben werden und sicher einzuhalten sind. Ein weiterer Punkt, der im engen Zusammenhang mit Toleranzen steht, ist die Wirtschaftlichkeit. Die Produktionswissenschaft stellt praktikable, rationelle und effiziente Verfahren für die Produktionstechnik zur Verfügung. Ein alter Konstruktionsgrundsatz sagt: konstruiere und fertige nicht so genau wie möglich, sondern so genau wie nötig. Hier wird der Zusammenhang zwischen Toleranzen und Herstellkosten angesprochen. Diese wenigen Beispiele mögen zeigen, dass das Arbeiten und die Berücksichtigung von **Toleranzen ein inhärenter Bestandteil der Produktionstechnik** sind. Die Produktionswissenschaft lebt also nicht nur mit der physikalisch vorgegebenen Randbedingung, dass absolute Genauigkeit nicht möglich ist, sondern sie muss auch berücksichtigen, dass Schwankungsbreiten zuweilen zwingend notwendig sind. Damit wird deutlich, dass eine strenge Kausalität, bei der ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Ursachen und Wirkungen vorausgesetzt wird, in der Produktionswissenschaft nicht vorausgesetzt werden darf. In diesem Zusammenhang muss das unter a) gemachte Postulat interpretiert werden, vielleicht sogar dahingehend geschärft werden, dass die Produktionswissenschaft gar nicht den Anspruch

erheben darf, exakt zu sein. Kausalitätsbeziehungen und Kausalitätsinterpretationen werden in der Produktionswissenschaft immer nur im eingeschränkten Sinne möglich sein. Dies soll im Folgenden an einigen Beispielszenarien näher erläutert werden.

Wertschöpfungskette

Die folgenden Abbildungen 1 bis 3 zeigen die grundsätzlichen Arbeitsschritte beim Entstehen eines Produktes/technischen Systems (von der Idee bis zum Produkt). In Abbildung 1 entwickelt sich die Wertschöpfungskette sequentiell. Der Konkretisierungsgrad nimmt auf der Y-Achse von oben nach unten zu, auf der X-Achse ist beispielhaft als Zielgröße die Zeit dargestellt. Die Anordnung der Arbeitsblöcke lässt eine **kausale Ordnung** erkennen. Die Ausgangskenngrößen eines Blockes sind offensichtlich notwendig, um im folgenden Block als Eingangsgrößen die Wertschöpfung weiterzuentwickeln. Über diese eindeutigen kausalen Zusammenhänge wird offensichtlich die Zeit (z. B. die Durchlaufzeit, die Lieferzeit) determiniert. In diesem Ablaufmodell sind die angewandten Zeitmodelle im Allgemeinen auf den Regeln der klassischen Logik aufgebaut (wenn → dann).

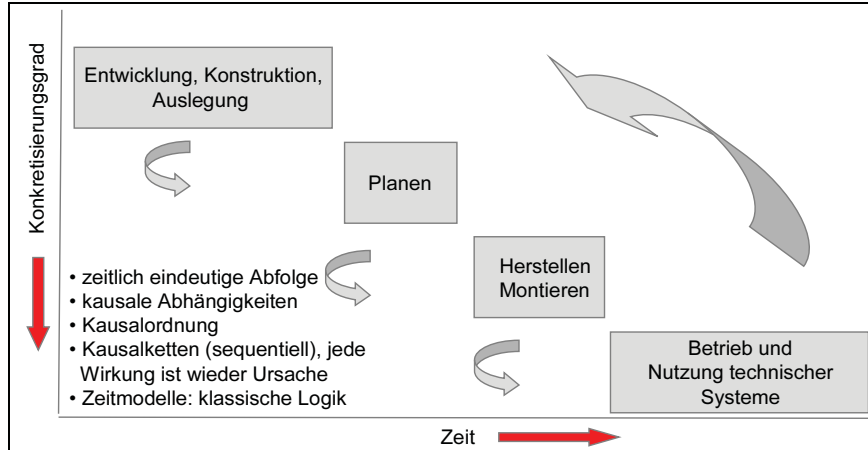


Abbildung 1
Sequentielle Wertschöpfung

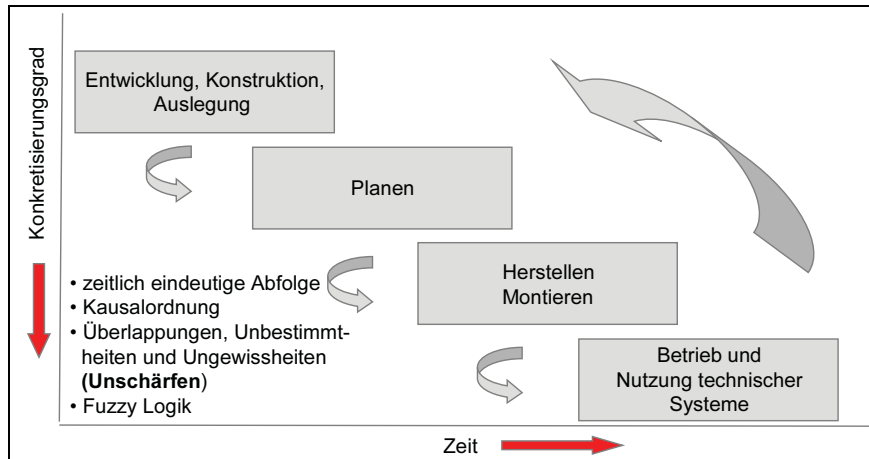


Abbildung 2
Parallele Wertschöpfung

Unter dem Zwang zur Verkürzung von Durchlaufzeiten und Lieferzeiten entwickelten sich im Laufe der Jahre neue Organisationsformen zum Aufbau und zur Gestaltung von Wertschöpfungsketten. Abbildung 2 zeigt Organisationsmodelle, die unter den Begriffen Simultaneous Engineering und/oder Concurrent Engineering zusammengefasst sind. Offensichtlich ist, dass in der zeitlichen Abfolge der Blöcke gewollte Überschneidungen eingebaut sind. So könnte beispielsweise bereits mit der Planung und Auswahl von Fertigungsverfahren begonnen werden, obwohl die Detaillierung und Auslegung der Komponenten eines technischen Systems in der Konstruktion noch nicht vollständig abgeschlossen ist. Die Zielgröße auf der X-Achse ist wiederum die Zeit. Andere Zielgrößen könnten in ähnlicher Form bewertet werden. Jetzt können die Zielgrößen nicht mehr mit eindeutigen logischen Verknüpfungen bestimmt werden. Die Zielgrößen sind unscharf. Modell- und Berechnungsmethodiken basieren deshalb in diesen Fällen häufig auf **unscharfer Logik**. Der Konkretisierungsgrad steigt auch hier auf der y-Achse von oben nach unten, allerdings ist auch hier nun ein Unschärfebereich erkennbar. Entscheidend ist, dass sich auch in dieser Organisation trotz vorhandener Unschärfen in der Konkretisierung und in der Zielerfüllung kausale Abhängigkeiten mit rationalen (logischen) Entscheidungsmodellen darstellen lassen.

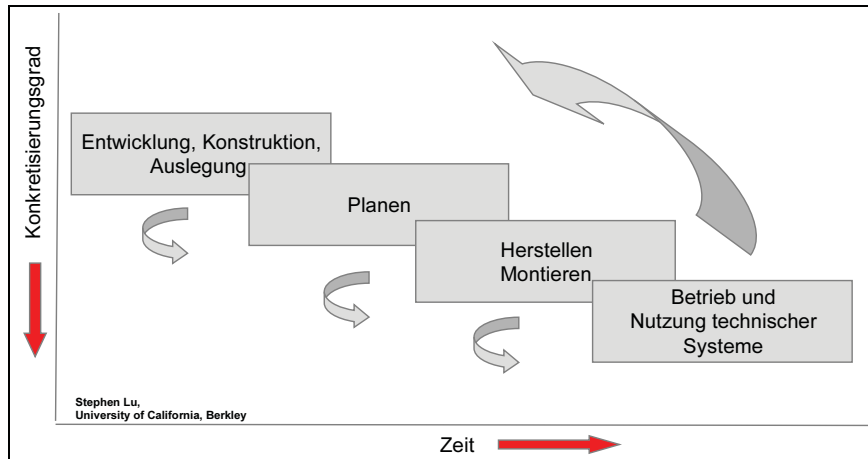


Abbildung 3
Engineering Collaboration
Acc. to Stephen Lu, University of California, Berkeley

Ein drittes, in neuerer Zeit diskutiertes Modell zur Organisation von Wertschöpfungsketten ist unter dem Begriff Collaborative Engineering bekannt geworden (ECN = Engineering Collaboration via Negotiation, Abb. 3). ECN ist entwickelt worden als eine neue Wissenschaftsplattform für teamorientiertes Forschen und Entwickeln in der Produktionswissenschaft. Eine kausale Ordnung in der Wertschöpfungskette ist auch hier erkennbar, Konkretisierungsfortschritt und Zielerreichung werden nun aber neben **rationalen** auch durch **emotionale** Faktoren bestimmt.

Komponentenherstellung

Im Folgenden soll das Herstellen von technischen Komponenten etwas näher in der Tiefe beleuchtet werden. Bei der Fertigung steht die Wandlung eines Rohteils zum Fertigteil im Fokus. Eine grundsätzliche Parallele hierzu findet sich in der Philosophie des Altertums und in der Ontologie. Aristoteles unterscheidet vier Fälle, die im Prinzip auch auf den Herstellprozess technischer Produkte angewandt werden können (Abb. 4). Die übergeordneten Kausalitätsbezüge sind heute offensichtlich die gleichen wie vor einigen tausend Jahren.

- Causa Materialis: Rohmaterial
(*Sein eines Gegenstandes, Ursprung*)
- Causa Formalis: Design, Kreativität, Konstruktion
(*Künstler*)
- Causa Efficiens: Herstellen des Gegenstandes (*Werden*)
- Causa Finalis: Nutzung (*Zweckbestimmung*)

Abbildung 4
Kausalitäten (n. Aristoteles)

Bei einer detaillierten Betrachtung des Formgebungsprozesses werden weitere Kausalitätsbezüge offensichtlich. Zur Überführung eines Rohmaterials in eine Fertigungskomponente muss Energie (Transformationsenergie) aufgewendet werden. Und unabhängig vom angewandten Fertigungsprinzip fließt ein Teil der aufgewandten Transformationsenergie immer in das Werkstück (Fertigteil) und verändert den Energieinhalt des Bauteils (Eigenspannungen, Phasenumwandlungen, Korngrößen). Mit der Änderung des Energieinhaltes ändern sich allerdings auch die Eigenschaften des Bauteils. Häufig sind die Auswirkungen quantitativ nicht bekannt. Die Folge ist, dass Eigenschaftsschwankungen auftreten. Ob die Eigenschaftsschwankungen technisch relevant sind, hängt von einer Einzelfallbetrachtung ab. Entscheidend ist, dass sie immer auftreten und zu **Unschärfen** führen. Bei nachfolgenden Fertigungsschritten können sie durch Überlagerung verstärkt oder geschwächt werden. Ganz zu vermeiden sind sie nicht. Dieser Prozess der wechselseitigen Einflussnahme von Fertigungsprozessen auf den Energieinhalt der gefertigten Komponente wird in der Fertigungstechnik auch als **Fertigungshistorie** bezeichnet. Zum Teil sind die Auswirkungen der Fertigungshistorie auf Zielgrößen bekannt, sie können dann in deterministischen Modellen berücksichtigt werden. Zum Teil treten sie aber auch zufällig auf und können dann in ihrer Wirkung allenfalls in probabilistischen Modellen berücksichtigt werden. Das Arbeitsergebnis (Erreichen der Zielgrößen) wird **unsicher**. Neben den Einflüssen der Fertigungshistorie auf Eigenschaftsschwankungen werden an einer Getriebewelle auch ganz bewusst Toleranzen für geometrische Formelemente vorgegeben, zum Beispiel Toleranzen an Lagersitzung zu Einstellung funktionell vorgegebener Spiele/Übermaße beim Paaren mit einem Gegenkörper. Ein Beispiel hierzu ist in Abbildung 5 dargestellt.

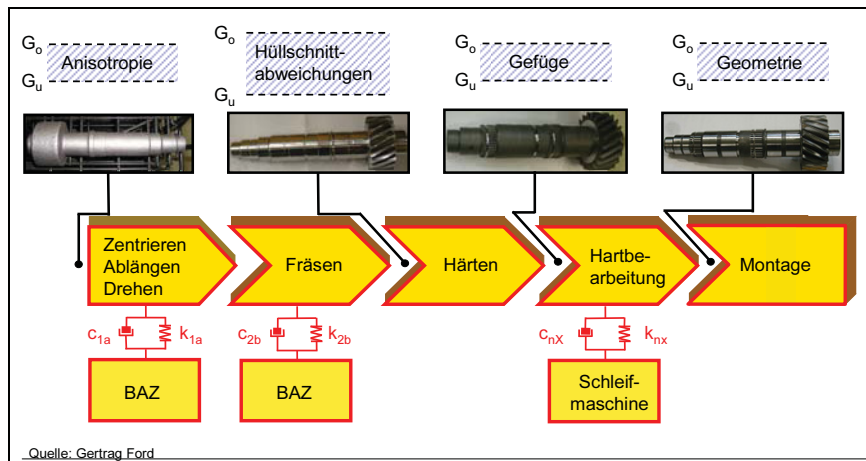


Abbildung 5
Getriebewelle

Es zeigt das Entstehen einer Getriebewelle mit ausgewählten Fertigungsverfahren. Ausgehend von einem vorgeschmiedeten Rohling entsteht in verschiedenen Fertigungsschritten eine einbaufertige Getriebewelle. Die kausalen Abhängigkeiten zwischen Ursachen und Wirkungen in den einzelnen Arbeitsschritten sind offensichtlich, die **Kausalordnung** ist eindeutig, die Vorhersage der Ergebniskenngrößen bzw. Zielgrößen ist aber auch hier nur mit Toleranzbändern (*Unschärfbereich*) möglich. Auch hier wird die Zeit über den Konkretisierungsgrad bestimmt. Der Fertigungsfortschritt ist zeitlich geordnet, und der **Kausalitätsbegriff** kann in Übereinstimmung mit der Interpretation vieler naturwissenschaftlicher Bereiche in seiner **eingeschränkten Form** ohne Widerspruch angewendet werden.

Die Modellierung von Wertschöpfungsketten erfolgt in der Produktionswissenschaft in erster Linie vorwärtsgerichtet. Aus der Anwendung unserer Modelle und Methoden sowie der wechselseitigen Abhängigkeiten leiten wir ab, dass bestimmte Zielgrößen sicher erreicht werden können. Wir postulieren **Kausalitätserwartungen**. Wenn unsere Erwartungen nicht eintreffen, waren offensichtlich die angenommenen Kausalitätsbeziehungen mindestens teilweise nicht zutreffend. Abbildung 6 zeigt ein Ergebnis, in dem eine technische Komponente entgegen aller Erwartungen frühzeitig versagte, obwohl, wie in den Ingenieurwissenschaften üblich, mit Versagenswahrscheinlichkeiten gerechnet wurde. In diesem Fall waren die kausalen Abhängigkeiten zwischen Ursachen und Wirkungen nicht ausreichend bekannt. Der Bruch eines Bohrers hat im gezeigten Fall nicht bekannte Mikrorisse in der

Oberfläche erzeugt, die zum vorzeitigen Ausfall der Komponente führten. Dieses Beispiel zeigt die hohe Komplexität und steht für die Vielzahl der in Wechselwirkung stehenden Parameter.

Eine wichtige Forschungsfrage der Produktionswissenschaft in der Modellierung von Fertigungshistorien ist, die kausalen Abhängigkeiten sorgfältig zu erforschen, sie zu modellieren und sie in ihrer Wirkung zu beschreiben und die Zusammenhänge allgemein gültig darzustellen. Häufig wird dabei in vorwärts gerichteten Kausalketten (Rohteil zum Fertigteil) in der Modellierung allgemein folgender Zusammenhang formuliert: das Ergebnis eines Fertigungsschrittes $y(t)$ ist kausal von x (der Ursache) abhängig, wenn bei einer gegebenen Informationsmenge zum Zeitpunkt $(t-1)$ zum Zeitpunkt t das Ergebnis (y) besser prognostiziert werden kann, als ohne Berücksichtigung von x (Ursache). Der zuvor genannte Modellierungsansatz kann auch in einer rückwärts gerichteten Kausalkette Anwendung finden, wenn es darum geht, von bekannten Ursachen (z. B. Schäden) auf Wirkungen zu schließen. Hier formulieren wir im Allgemeinen folgendermaßen: ein bestimmtes Ergebnis $y(t)$ kann zum Zeitpunkt t (Betriebszeitpunkt) dann sicher angenommen werden, wenn zum Zeitpunkt $(t-1)$ alle herstellbezogenen Informationen bekannt sind, die kausal mit dem Ergebnis zusammenhängen.

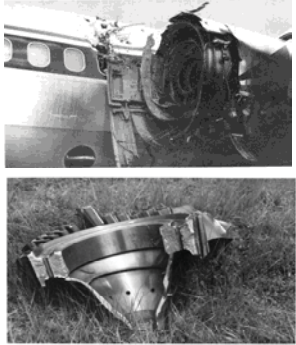
<p style="text-align: center;">ACCIDENT DL 1288, July 6, 1996 - Pensacola, Florida</p> <ul style="list-style-type: none">• MD-88 engine failure on take-off roll• Pilot aborted take-off• Stage 1 Fan Disk separated; impacted cabin• Life Limit: 20,000 cycles. Failure: 13,835 cycles• Poorly machined Failure from bolt hole• 2 fatalities• NTSB Report recommended ...<ul style="list-style-type: none">- Changes in inspection methods, shop practices- Fracture mechanics based damage tolerance	
Enhanced In-Service Inspection and Robust Manufacturing Initiatives	

Abbildung 6
Läuferscheibe

Komplexität

Sowohl bei der gesamtheitlichen Betrachtung von Wertschöpfungsketten als auch bei der Herstellung von einzelnen Komponenten liegt eine hohe Komplexität in den zu modellierenden Systemen vor. Dies wird durch Forderungen des Marktes nach variantenreicher Fertigung bei kleinen Losgrößen, hoher Zuverlässigkeit und niedrigen Kosten sowie durch kurze Lieferzeiten weiter verschärft. Die Grenzen des technisch und wirtschaftlich Machbaren werden immer wieder neu hinterfragt. Die Leistungsanforderungen an Fertigungseinrichtungen (Werkzeugmaschinen und Werkzeuge), die Komplexität der Gesamtsysteme und auch die Komplexität der Organisation und Informationsflüsse in der Fabrik führen häufig bereits bei kleinsten Änderungen zu nicht kontrollierbaren bzw. nicht erwarteten Auswirkungen. Um in Abhängigkeit vom Komplexitätsgrad Systeme in Modellen möglichst realitätsnah abzubilden, werden in der Produktionswissenschaft neben den zuvor genannten Ansätzen auch nichtlinear-dynamische Modellierungen eingesetzt. Hier geht es im Wesentlichen darum, im Experiment und in der Realität beobachtete Phänomene in möglichst realitätsnahen Modellen abzubilden, um entweder Sensitivitätsanalysen über starke und schwache Kausalitätsabhängigkeiten zwischen einzelnen Einflussgrößen zu erforschen oder auch das Modellverhalten unter gegebenen Randbedingungen möglichst realitätsnah zu prognostizieren.

Zusammenfassung

Die Produktionswissenschaft/Produktionstechnik ist anwendungsorientiert. Sie überträgt naturwissenschaftliche Grunderkenntnisse auf praktisch nutzbare Lösungen, dies erfolgt zielorientiert. Die Ergebnisgrößen (Kausalitätserwartung) sind auf der höchsten Aggregationsebene

- die sichere Funktionalität des technischen Systems,
- die Kosten,
- die Durchlaufzeit und
- die Effizienz.

Die zuvor genannten Beispiele haben gezeigt, dass in der Produktionswissenschaft Kausalitätsdefinitionen nur im eingeschränkten Sinne verwendet werden. Produktionstechnische Anwendungen sind nicht streng determinierbar. Deshalb sind Beispiele für Kausalitätsdefinitionen für die Produktionswissenschaft auch nicht im Determinismus

(Descartes) zu finden. Produktionswissenschaft beinhaltet im Selbstverständnis bereits die Akzeptanz von gewissen Unschärfen, von Unsicherheiten und Toleranzen. Auf der anderen Seite ist aber auch der absolute Zufall (Kopenhagener Modell) kein Gedankenmodell für die Produktionswissenschaft, das zur Definition von Kausalitätsbezügen dienen könnte. In der Produktionswissenschaft muss der Kausalitätsbegriff sowohl physikalische Grenzen, technische Forderungen und wirtschaftliche Bezugsgrößen zusammenführen. Strenge Kausalitäten werden in der Produktionswissenschaft nicht unterstellt. Dennoch scheint auch der Begriff der eingeschränkten Kausalität für die Produktionswissenschaft nicht ausreichend zu sein. Er lässt zwar mit vielen Bereichen der Naturwissenschaft Gemeinsamkeiten erkennen und ist damit eine gute Basis zur allgemein gültigen Akzeptanz, dennoch stehen in der Produktionswissenschaft und in der Produktionstechnik neben der Funktionalität immer auch die Wirtschaftlichkeit und die praktische Nutzenanwendung des Erzeugten gleichbedeutend auf einer Stufe. Um auch diese Facette in Kausalitätsbezügen und in der Kausalitätsdefinition zu berücksichtigen, mag für die Produktionswissenschaften eine Erweiterung des Begriffes nützlich sein.

Einige Gedankenansätze für einen erweiterten Kausalitätsbegriff sind im Rationalismus zu finden. Das Rationalisieren und die Wirtschaftlichkeit sind Fragen, die im Unternehmen unverzichtbar sind, und sie sind auch ein wichtiges Arbeitsfeld für die Produktionstechnik. Die Frage nach der Verhältnismäßigkeit der Mittel steht immer mit im Mittelpunkt. Bei vielen Fragen greift auch der Mensch mit seiner persönlichen Gewichtung und Wirkung in die Entscheidungsfindung ein. Am Ende eines jeden Prozesses, am Ende einer jeden Wertschöpfungskette, stehen allerdings in jedem Fall sehr **rationale und eindeutige Zielsetzungen (Kausalitätserwartungen)**. Auch die Ergebniserwartungen aus den Entscheidungsprozessen und angewandten Modellen sind letztlich sowohl **technisch rational** wie **wirtschaftlich rational**. Unter Berücksichtigung dieser zusätzlichen Aspekte mag der Gedanke in die Diskussion eingebracht werden, ob in der Produktionswissenschaft/Produktionstechnik nicht die Begriffe **rationale Kausalitätserwartung** oder auch **rationale Kausalität** den Definitionsumfang für Kausalitätsbezüge angemessen erweitern.