



HAL
open science

Die C-K-Konstruktionstheorie

Pascal Le Masson, Armand Hatchuel, Benoit Weil

► **To cite this version:**

Pascal Le Masson, Armand Hatchuel, Benoit Weil. Die C-K-Konstruktionstheorie. Integrated Design Engineering - Interdisciplinary and holistic product development, 2020. hal-03042510

HAL Id: hal-03042510

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-03042510v1>

Submitted on 11 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

1.1.4. Die C-K-Konstruktionstheorie

Die C-K-Konstruktionstheorie¹ wurde 1996 von A. HATCHUEL und B. WEIL eingeführt [HaWe-2003] [HaWe-2009]. Sie ist heute Gegenstand zahlreicher Veröffentlichungen in der wissenschaftlichen Literatur. Neuere Forschungsarbeiten befassen sich mit Auswirkungen, praktischen Anwendungen und neuen Entwicklungen dieser Theorie. In diesem Kapitel werden Grundprinzipien und neueste Formulierungen der C-K-Konstruktionstheorie vorgestellt, ohne auf die Details der in dieser Theorie verwendeten Formalismen einzugehen.

1.1.4.1. Ursprung und intuitive Motivation

Die Erwartungen an die C-K-Konstruktionstheorie sind fünffach:

- Aus der Sicht der aktuellen Innovationsherausforderungen: Eine Theorie, die in der Lage ist, solche Entwicklungsprobleme anzugehen, die mit traditionellen Problemlösungs- und Optimierungsmethoden nicht gelöst werden können, wie z. B. "Entwerfen neuer Anwendungen für neue Technologien", "das Design von Produkten/Dienstleistungen anhand sehr allgemeiner Anforderungen" (z. B. "intelligente Mobilität"), "das Design unter sehr starken Einschränkungen" (z. B. "Null-Energie", "sparsame Innovation", etc.).
- Aus der Sicht von Berufen in Entwicklung und Konstruktion beliebiger Produkte: Bereitstellung einer "einheitlichen Entwicklungs- und Konstruktionstheorie", die für alle Arten solcher Berufe (z. B. Industriedesign, Produktkonstruktion, Architektur,...) gleichermaßen geeignet ist.
- Aus der Sicht von Formalismen: Ein formales Modell, das für "radikale Kreativität" steht, weil es eine starke Generativität² besitzt.
- Aus der Sicht von Methoden: Eine Theorie, die Methoden für den Prozess des sogenannten "Erfindens" oder "Entdeckens" (und damit eigentlich Entwicklung und Konstruktion) von neue funktionalen Anforderungen und die Erweiterung von Designparametern unterstützt.
- Aus kognitiver Sicht: Eine Theorie und damit verwandte Methoden zum Überwinden von Fixationen³.

Um die intuitive Motivation für die C-K-Konstruktionstheorie zu beschreiben, sollte man beachten, dass sich diese Theorie auf die Frage der Charakterisierung einer Entwurfsaufgabe und ihrem Ausgangspunkt konzentriert, wobei letzterer meist als "Vorgaben", "Programm" oder "Spezifikationen" bezeichnet wird. Im Gegensatz zu "abbildungsorientierten" Konstruktionstheorien (wie Programmierung, Problemlösung, Optimierung, alle abgeleitet von der Simonianischen Theorie des Designs⁴), die dazu neigen, die anfängliche Aufgabe zu klären und Lösungen *innerhalb* von vorgegebenen Räumen zu entwickeln, versucht die C-K-Konstruktionstheorie, Unklarheit, Mehrdeutigkeit, Unvollständigkeit oder Unschärfe der ursprünglichen Vorgaben zu bewahren, gerade weil es diese Merkmale ermöglichen, eine Abbildung selbst zu regenerieren. Die C-K-Konstruktionstheorie modelliert daher den Entwurf eines *wünschenswerten*, aber *teilweise unbekanntes* "Objekts", über dessen Ausprägung unter Anwendung des zunächst

1 C für Englisch *Concept* (Konzept), K für Englisch *Knowledge* (Wissen). Für eine Einführung in die C-K-Konstruktionstheorie siehe [AHAB-2014], für eine umfassende Synthese und Beispiele dazu siehe [MaWH-2017].

2 Die Generativität ist die Fähigkeit einer Entwicklungstheorie, neue und neuartige Lösungen aus einem bestimmten Wissensstand zu entwickeln (akademische Referenzen in [MaWH-2017]).

3 Eine Fixation (in Design- und Kreativitätskognition) beschreibt den Zustand, dass Produktentwickler / Konstrukteure bei einer Entwicklungsaufgabe dazu neigen, nur eine begrenzte Anzahl von Alternativen zu erkunden. Ihre Voreingenommenheit hindert sie kognitiv daran, die ganze Palette der denkbaren Alternativen zu erforschen (akademische Referenzen in [MaWH-2017]).

4 Die Simonianische Theorie des Designs, formuliert von H. A. SIMON in den 1960er Jahren, basiert auf Suchalgorithmen in komplexen kombinatorischen Problemräumen (vgl. z.B. [Simo-1997]).

verfügbaren Wissens nicht entschieden werden kann. Diese intuitive Motivation wirft kritische formale Fragen auf: Wie kann man bei einem teilweise unbekanntem Objekt präzise schlussfolgern? Wie kann man die Evolution von Wissen, das erzeugt und / oder durch den Entwicklungsprozess erweitert werden muss, berücksichtigen? Diese Fragen werden in der C-K-Konstruktionstheorie behandelt, wie es im Folgenden dargestellt wird.

1.1.4.2. Wesentliche Definitionen und Eigenschaften

Das Grundprinzip der C-K-Konstruktionstheorie ist es, Entwicklungen als Interaktion zwischen zwei Räumen, dem Raum der Konzepte (C) und dem Raum des Wissens (K), mit den folgenden Definitionen und Implikationen zu modellieren (siehe auch **Tabelle 1.x**):

- **Definition des K-Raums:** Der K-Raum besteht aus Sätzen (Propositionen), die dadurch gekennzeichnet sind, dass sie *alle einen logischen Status* (wahr oder falsch) *aufweisen*.
- **Definition des C-Raums:** Die Propositionen des C-Raums sind dadurch gekennzeichnet, dass sie *interpretierbar, aber unentscheidbar in Bezug auf die tatsächlich vorhandenen Propositionen im K-Raum sind*. In Bezug auf das aktuell verfügbare Wissen ist daher ein Nachweis, ob die Propositionen im C-Raum wahr oder falsch sind, nicht möglich. Um dieses Problem zu lösen, ist eine Ausweitung des verfügbaren Wissens erforderlich (siehe Abschnitt 1.1.4.3). Es ist zu beachten, dass diese Ausweitung relativ zu K erfolgt (K-relativ). Mit einem weiteren Verweis auf K kann eine Proposition wahr (oder falsch) werden.
- **Struktur von C:** Die Konzepte haben die Form " $C_n = \text{es gibt eine (nicht leere) Klasse von Objekten } X, \text{ für die eine Gruppe von Eigenschaften } p_1, p_2, \dots, p_n \text{ in } K \text{ wahr ist}$ ".
- **Struktur von K:** Die Struktur von K ist ein freier Parameter der C-K-Theorie. Dies entspricht der Tatsache, dass in Entwicklung und Konstruktion jede Art von Wissen, aber auch alle Arten von Logik, wahr oder falsch, verwendet werden können; K kann mit einfachen Graphenstrukturen, starren Taxonomien, flexiblen Objektstrukturen oder spezifischen Topologien oder Hilbert-Räumen modelliert werden, wenn es stochastische Sätze in K gibt. Die einzige Einschränkung aus Sicht der C-K-Konstruktionstheorie besteht darin, dass Propositionen mit einem logischen Status (entscheidbar) von solchen zu unterscheiden sind, die nicht entscheidbar sind.

1.1.4.3. Konstruktionsprozess: C-K Partitionen und Operatoren

Eine Konstruktion beginnt mit einem Konzept C_0 , einer Proposition, die mit den anfänglichen Inhalten des vorhandenen K-Raums unentscheidbar ist. Die Theorie formalisiert, wie aus dieser nicht entscheidbaren Proposition eine entscheidbare Proposition wird. Dieses wird realisiert durch zwei Prozesse, nämlich *Expansionen* in K und *Partitionen* in C:

Expansionen in K: Es ist möglich, den K-Raum durch Lernen, Experimentieren, Umgestalten, weiteren Wissenstransfer, etc. zu erweitern. Diese Expansion kann so lange fortgesetzt werden, bis eine entscheidungsfähige Definition für das Ausgangskonzept in dem dadurch ausgeweiteten K-Raum vorliegt. Ein ausgeweiteter K-Raum wird mit K^* bezeichnet.

Partitionen in C: Es ist möglich, Attribute⁵ (die im K-Raum bekannt sind) zu einem Konzept hinzuzufügen, um die Entscheidbarkeit dieses Konzepts zu fördern. Dieser Vorgang wird als *Partition* bezeichnet. In der C-K-Konstruktionstheorie sind die Partitionen eines Konzepts C_0 die Klassen, die durch Hinzufügen von Eigenschaften (aus dem K-Raum) zum Konzept C_0 entstehen. Formal führt das Hinzufügen von p_{n+1} (aus dem K-Raum) zu C_n zu einem Konzept $C_{n+1} = \text{es existiert eine (nicht leere) Klasse von Objekten } X, \text{ für die eine Gruppe von Eigenschaften } p_1, p_2, \dots, p_n, p_{n+1} \text{ in } K \text{ wahr ist}$.

5 Nicht zu verwechseln mit dem Begriff "Attribut", der im Integrated Design Engineering verwendet wird (Definition und Beschreibung siehe Kapitel 2).

Implikation 1: Diese Expansionen setzen sich fort, bis sie auf eine aus C_0 abgeleitete Proposition stoßen, die in K^* *entscheidbar* wird (wie es bei der Untersuchung der Entscheidbarkeit des Konzepts der Fall ist, d.h. wenn der Existenznachweis erbracht wird). Das Konzept wird damit zu einer echten Proposition in K^* . In der C-K-Konstruktionstheorie wird dieser Vorgang als *Konjunktion* bezeichnet.

Implikation 2: Eine Partition stellt jeweils ein ganz bestimmtes Problem dar: Was ist der Status des neuen C_{n+1} ? Dieser Status muss "getestet", d.h. seine Entscheidbarkeit in Bezug auf den K-Raum muss untersucht werden. Dieses entspricht der Erstellung von Prototypen, Mock-Ups und Experimentierplänen usw. Solche Operationen können wiederum zu Expansionen des K-Raums führen, die nicht unbedingt mit dem zu testenden Konzept zusammenhängen (beispielsweise durch Überraschung, Entdeckung, Serendipität⁶, usw.). Der Test hat zwei mögliche Ergebnisse für C_{n+1} : Entweder erweist sich C_{n+1} als unentscheidbar in Bezug auf K, die Proposition wird daher zu einer Proposition im K-Raum und der Konstruktionsprozess kann erfolgreich beendet werden oder C_{n+1} bleibt unentscheidbar in Bezug auf K und die Proposition befindet sich im C-Raum.

Alle in der C-K-Konstruktionstheorie beschriebenen Operationen werden über vier elementare Operatoren durchgeführt, welche die internen Veränderungen innerhalb der Räume ($K \rightarrow K$ und $C \rightarrow C$) und die Wirkung eines Raumes auf den anderen ($K \rightarrow C$ und $C \rightarrow K$) darstellen.

1. Der Operator K in K enthält die klassischen Operationen Inferenz, Ableitung, Entscheidung, Optimierung usw.
2. Der Operator C in C erzeugt unentscheidbare Sätze auf der Grundlage anderer unentscheidbarer Sätze und verwendet dabei nur C-Sätze.
3. Der Operator K nach C, der Disjunktionsoperator, besteht darin, eine neue unentscheidbare Proposition in C auf der Grundlage von entscheidbaren Propositionen in K zu erstellen.
4. Der Operator C nach K, der Konjunktionsoperator, besteht darin, entscheidbare Propositionen in K auf der Grundlage von unentscheidbaren Propositionen in C zu erstellen.

Tabelle 1.X zeigt sowohl eine Synopse als auch ein Glossar der wichtigsten Definitionen und ersten Ergebnisse der C-K-Konstruktionstheorie.

Tabelle 1.X Glossar der wichtigsten Definitionen und ersten Ergebnisse der C-K-Konstruktionstheorie

1	Ein Satz von Propositionen mit einem logischen Status wird als K-Raum bezeichnet.
2	Die Ergänzung eines Proposition in K wird als Expansion des K-Raums bezeichnet. Per Definition hat diese Proposition Satz einen logischen Status (wahr / falsch).
3	In einem K-Raum wird eine Proposition der Form $\{x, P(x)\}$, die in der Basis K interpretierbar ist (P ist in K) und in der Basis K unentscheidbar (P ist in K), als Konzept bezeichnet (die Proposition $\{x, P(x)\}$ ist in K weder wahr noch falsch).
4	Das Hinzufügen einer zusätzlichen Eigenschaft zum Konzept (die dann zu $\{x, P(x), pk(x)\}$ wird) wird als Partition bezeichnet. <ul style="list-style-type: none"> • Anmerkung: C ist K-relativ. • In einem set-weisen Ansatz ist ein Konzept eine Menge, aus der kein Element extrahiert werden kann. • Grundsatz: Ein Konzeptraum hat eine Baumstruktur.
5	Ein Operator ist ein Vorgang (mit K oder C), der darin besteht, ein Konzept (Partition) oder den K-Raum (Expansion) zu transformieren.

6 Die (offensichtliche Fähigkeit), zufällig glückliche Entdeckungen zu machen, wobei immer wieder durch Zufälle und Scharfsinn Dinge und Phänomene entdeckt werden, nach denen nicht gesucht wurde (beispielsweise wurde der Klettverschluss während einer Jagd seines Erfinders im Unterholz konzipiert, als an seiner Hose und an seinem Hund Kletten hingen. Er untersuchte, auf welche Art die Kletten sich festhalten, und transferierte dann diese Funktionen auf andere Anwendungsgebiete).

	Primäre Operatoren: $K \rightarrow K$, $C \rightarrow C$, $K \rightarrow C$, $C \rightarrow K$.
6	$K \rightarrow C$ ist der Trennungsoperator (Disjunktion): Übergang von entscheidbaren Propositionen zu einer unentscheidbaren Proposition (Arbeiten im Unbekannten unter Verwendung von Bekanntem).
7	$C \rightarrow K$ ist der Verbindungsoperator (Konjunktion): Übergang von einer unentscheidbaren Proposition zu einer entscheidbaren Proposition (Verwendung des Unbekannten zur Erweiterung des Bekannten).
8	Bei einem Raum K und einem C ($\{x, P_1, P_2, \dots, P_n(x)\}$) in diesem Raum K , ist eine expansive Partition (umgekehrt restriktiv) eine Partition von C , welche die Eigenschaft P_{n+1} nutzt, die in K nicht als bekannte Eigenschaft im Zusammenhang mit X (noch mit einem der P_i , $i \leq n$) betrachtet wird (umgekehrt ist es eine Eigenschaft P_{n+1} , so dass P_{n+1} mit X in K verbunden ist oder es gibt ein i , $i \leq n$, so dass P_i und P_{n+1} in K verbunden sind).

1.1.4.4. Wichtigste Auswirkungen

Eines der unmittelbaren Ergebnisse der C-K-Konstruktionstheorie ist, dass der C-Raum für ein bestimmtes C_0 notwendigerweise eine **Baumstruktur** hat, da die Baumstruktur eine Folge der Ordnungsbeziehung ist, die durch aufeinanderfolgende Partitionen erzeugt wird.

Zweitens erlaubt die C-K-Konstruktionstheorie die Unterscheidung zwischen **zwei Arten** von Partitionen: Beschränkte Partitionen und erweiterbare (expansive) Partitionen. Ein Konzept ist interpretierbar, daher bezieht es sich auf ein in K vorhandenes Wissen. Eine restriktive Partition ist eine Partition, die Attribute verwendet, die aus dem Wissen stammen, das dem Konzept zugeordnet oder mit ihm kompatibel ist. Im Gegensatz dazu ist eine expansive Partition eine Partition, die Attribute verwendet, die mit diesem Wissen nicht kompatibel sind. Expansive Partitionen

- führen zu einer Überarbeitung der Definition von Objekten,
- lenken die Erforschung auf solches neues Wissen, das nicht mehr aus dem verfügbaren Wissen abgeleitet wird.

Die generative Kraft der C-K-Konstruktionstheorie beruht auf der Kombination dieser beiden Effekte von expansiven Partitionen.

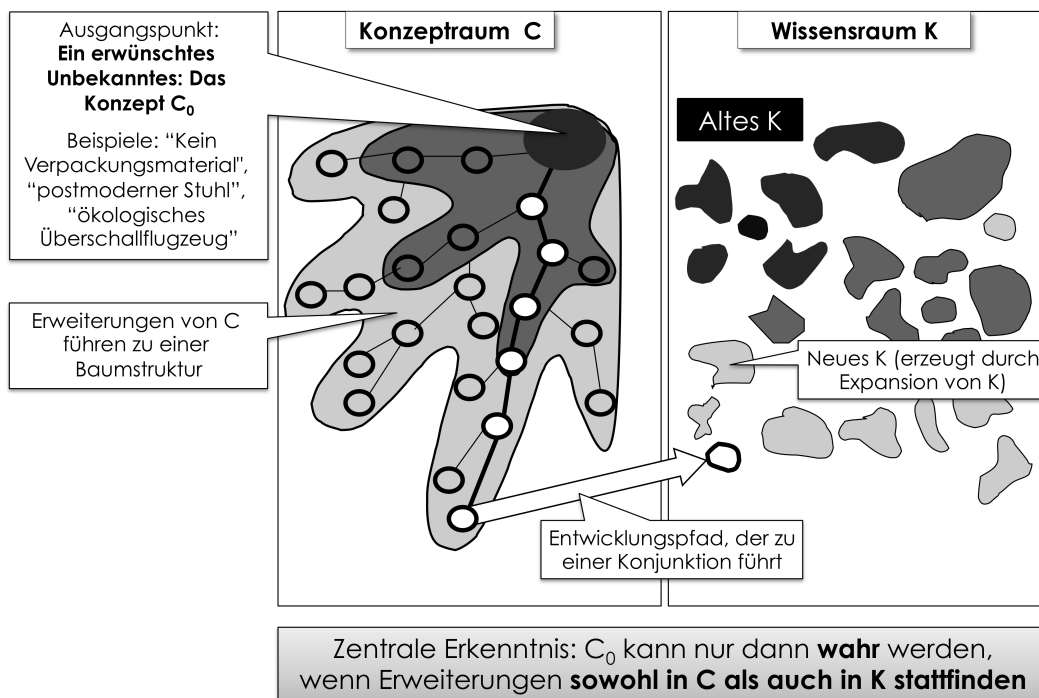


Abbildung 1: Zusammenfassung der Elemente C-K-Konstruktionstheorie [MaWH-2017, S. 140]

Im Folgenden werden die verschiedenen C-K-Begriffe an einem einfachen Beispiel veranschaulicht. Weitere Fallbeispiele finden sich beispielsweise in [MaWH-2017].

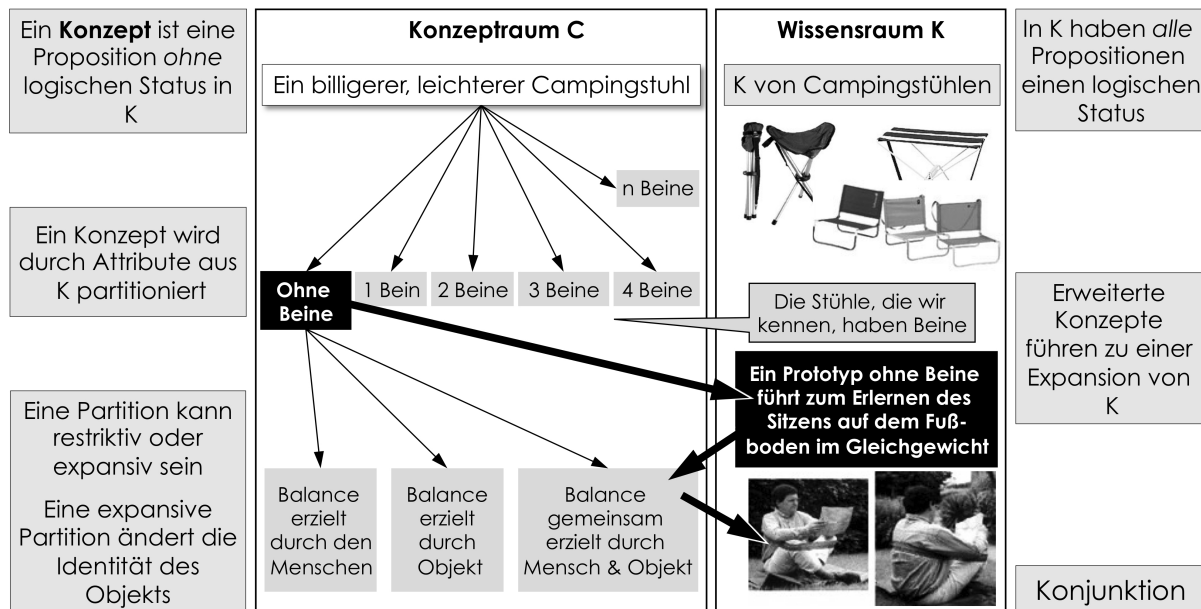


Abbildung 2: Ein einfaches Beispiel zur Veranschaulichung der wichtigsten Begriffe der C-K-Konstruktionstheorie [MaWH-2017, S. 137]

Die Aufgabe bestand darin, einen innovativen Campingstuhl zu entwickeln, der billiger und leichter ist als herkömmliche Campingstühle. Das zu Anfang vorhandene Wissen in K umfasst das Wissen über Campingstühle. Das zu Anfang vorhandene Konzept C_0 ist daher ein billigerer und leichterer Campingstuhl. Diese Proposition kann mit Eingangskenntnissen über Campingsstühle, ihr Gewicht und ihre Kosten interpretiert werden. Da es zu diesem Zeitpunkt (Beginn der Konstruktion) noch unmöglich ist, einen solchen Stuhl aufzuzeigen, ist die Proposition unentscheidbar - und es ist zu diesem Zeitpunkt auch nicht möglich zu beweisen, dass ein solcher Stuhl unmöglich ist.

Um dieses teilweise unbekanntes Konzept C_0 zu erforschen, wird C_0 unter Nutzung einer Proposition aus K partitioniert: "Stühle, die wir kennen, haben Beine". Dieser Vorschlag ermöglicht es, die Konzepte "ein billigerer und leichterer Campingstuhl mit *einem* Bein", "ein billigerer und leichterer Campingstuhl mit *zwei* Beinen" usw. zu entwickeln. Diese Konzepte sind Teilmengen des ursprünglichen Konzepts C_0 . Dabei ist zu beachten, dass die Auflösung der Teilmengen möglicherweise nicht das gesamte Konzept C_0 abdeckt.

Um eine rigorose Partition von C_0 zu erreichen, sollte man das Konzept "ein Campingstuhl *ohne* Beine" hinzufügen. Dies ist formal ein Konzept (weder wahr noch falsch) und dies ist auch eine expansive Partition, da der Stuhl in dieser Teilmenge eine Eigenschaft hat ("ohne Bein"), die keine übliche Eigenschaft eines Campingstuhls ist. Das daraus resultierende neue Konzept "ein billigerer und leichterer Campingstuhl ohne Beine" kann mit Propositionen aus K aufgeteilt werden. Das Konzept schlägt hier vor, in K nach Wissen über Stühle ohne Beine zu suchen. Zum Beispiel können Experimente mit einem Stuhl, dessen Beine abgeschnitten wurden, durchgeführt werden. So wird dann (als weitere Eigenschaft) das "Sitzgleichgewicht" in die Betrachtung eingeführt. Dies ist eine Wissenserweiterung, die dann zu der Partition "ein billigerer und leichterer Campingstuhl ohne Beine" verwendet wird. Schritt für Schritt wird das Konzept C_0 aufgeteilt und es können dabei teilweise recht seltsame Stühle entstehen. Die Reihenfolge der Partitionen bietet Nachbesserungen solange an, bis der Satz in C wahr wird und es zu einer Konjunktion kommt. Die wahre Proposition befindet sich dann in K.

1.1.4.5. Einige Auswirkungen

Auch wenn in diesem Kapitel die Darstellung der C-K-Konstruktionstheorie kurz und bündig ist, kann der Leser sicher sein, dass die Theorie mit den weiter oben beschriebenen Elementen den ursprünglichen Erwartungen aus Abschnitt 1.1.4.1 entspricht:

- Die Theorie ist gut geeignet, die in Abschnitt 1.1.4.1 aufgeführten Arten von Innovationen zu behandeln.
- Berufliche Erwartungen: Die Theorie ermöglicht es, das Verhältnis zwischen den K-orientierten Berufen (Ingenieurwesen) und den C-orientierten Berufen (Formgebung, Entwurf, Entwicklung) zu berücksichtigen. Es zeigt auch, dass es K in Formgebung, Entwurf, Entwicklung und C im Ingenieurwesen gibt.
- Formale Erwartungen: Einbeziehung des kreativen Akts in Entwicklung und Konstruktion, beispielsweise durch expansive Partition, Vererbung, ausgereifte Ontologie, invariante Ontologie, usw.
- Methodische Erwartungen: Die Theorie ermöglicht die Überarbeitung von Objektdefinitionen und damit die Erweiterung der Liste der funktionalen Anforderungen und der Entwurfsparameter.
- Kognitive Erwartungen: Die Theorie ermöglicht es, die Auswirkungen der Fixation zu überwinden: Eine Fixation ergibt sich aus der Definition bestimmter Objekte; allerdings ermöglicht die Theorie, dass diese Definitionen im K-Raum dargestellt und dann über expansive Partitionen in C rigoros und systematisch neu diskutiert werden.

Auf der Grundlage der C-K-Konstruktionstheorie wurden mehrere Techniken, Methoden und Prozesse entwickelt, um innovative Entwurfsprozesse und -organisationen zu unterstützen.

Intensive Forschungsarbeiten haben dazu geführt, dass die theoretischen Grundlagen der C-K-Konstruktionstheorie (C-K Designtheorie und Forcieren, generative Wissensstrukturen, C-K-Konstruktionstheorie und Konstruktionslogik,...) vertieft und offengelegt wurden.

1.1.4.6. Quellenverzeichnis

- [AHAB-2011] Agogué, M., Hooge, S., Arnoux, F., Brown, I.: An Introduction to Innovative Design - Elements and Applications of C-K theory. Sciences de la Conception. Les Presses de l'Ecole des Mines Paris 2014
- [HaWe-2003] Hatchuel, A., Weil, B.: A new approach to innovative design. An introduction to C-K theory. In: Norell, M. (Editor): ICED03, Research for Practice – Innovation in Products, Processes and Organisations. p 14
- [HaWe-2009] Hatchuel, A., Weil, B.: C-K design theory: An advanced formulation. Research in Engineering Design 19(2009)4, pp181-192.
- [MaWH-2017] Le Masson, P., Weil, B., Hatchuel, A. (2017) Design Theory - Methods and Organization for Innovation. Springer International Publishing AG. doi:10.1007 / ISBN 978-3-319-50277-9
- [Simo-1997] Simon, H. A.: The Sciences of the Artificial. MIT Press, Cambridge (USA), third edition 1997