

# Hybrides Planen — Von der Theorie zur Praxis<sup>1</sup>

Pascal Bercher<sup>2</sup>

**Abstract:** Die Dissertation legt Grundlagen, die es erlauben, Planungstechnologie der Künstlichen Intelligenz als Basis für flexible Assistenzsysteme einzusetzen. Die Aufgabe der automatischen Handlungsplanung ist es hierbei, selbständig einen Plan zu entwickeln, der dem Nutzer Schritt für Schritt präsentiert wird und ihn oder sie bei der Bearbeitung einer entsprechenden Aufgabe anleitet. Durch die starke Miteinbeziehung eines menschlichen Nutzers ergeben sich viele neue Herausforderungen: Pläne müssen schnell gefunden werden; und sie sollen nicht nur korrekt sein, sondern auch kostengünstig und dem Nutzer plausibel erscheinen; und sie sollen erklärbar sein, um Transparenz zu schaffen. Aus diesem Grund wurde das hybride Planen gewählt, ein hierarchischer, nicht-linearer Planungsansatz. Es wurden neue Komplexitätsergebnisse für das Planexistenz- und das Planverifikationsproblem erzielt; die ersten zulässigen Heuristiken erforscht, welche das Finden optimaler Pläne garantieren; und es wurde ein prototypisches Assistenzsystem realisiert, das seinen Nutzer bei dem Aufbau einer komplexen Heimkinoanlage unterstützt.

## 1 Einleitung

Technische Systeme werden immer komplexer. Trotz der zunehmenden technischen Möglichkeiten sind Nutzer moderner technischer Geräte heutzutage immer noch oft auf sich allein gestellt. Meist muss der Nutzer erst erlernen, wie das entsprechende Gerät zu bedienen ist, wo er oder sie welche Funktion findet und was sie genau bewirkt. Unterstützung erhält man nur selten: Erklärungen sind meist nur in Form von unübersichtlichen Bedienungsanleitungen vorhanden, die vorgefertigte Texte darstellen und damit nicht auf die aktuelle Situation zugeschnitten sind. Sprachgesteuerte Assistenten verbessern bereits heute diese Situation, da sie ein einfaches Steuern der entsprechenden Geräte erlauben. *Companion-Technologie* jedoch hat das Ziel, technische Systeme jeder Art zu *kognitiven* technischen Systemen aufzuwerten, die ihre Nutzer durch kognitive Fähigkeiten wie Planen und Schlussfolgern anleiten und unterstützen [BW16, Bi16, BW17]. Ergänzt durch Technologien der Mensch-Maschine-Interaktion wird das generelle Bedienkonzept der Systeme nutzerfreundlicher gestaltet sowie Erklärbarkeit der eigenen Funktionalität und damit Transparenz erreicht. Die Dissertation legt die hierfür relevanten Grundlagen im Bereich der Handlungsplanung und zeigt, wie hierdurch flexible Assistenten realisiert werden können.

Durch den Einsatz von Handlungsplanung als Basistechnologie für Assistenzsysteme ergeben sich eine Vielzahl von Anforderungen an die Handlungsplanung. Grundvoraussetzung ist, dass der Planungsprozess möglichst schnell abgeschlossen ist, da nicht zu erwarten

---

<sup>1</sup> Englischer Originaltitel der Dissertation: „Hybrid Planning — From Theory to Practice“ [Be18]. Die zwölf Hauptbeiträge der kumulativen Dissertation sind insbesondere in der Conclusion als solche hervorgehoben.

<sup>2</sup> Institut für Künstliche Intelligenz, Ulm University, pascal.bercher@uni-ulm.de

ist, dass Nutzer ein System benutzen werden, welches lange Wartezeiten erfordert. Die dem Nutzer präsentierten Handlungsempfehlungen müssen außerdem plausibel sein. Dazu zählt, dass sie nicht „irgendwelche“ Lösungen darstellen, sondern möglichst *gute*, d.h. kostengünstige. Schließlich müssen die gefundenen Handlungsempfehlungen auch in einer intuitiven Reihenfolge dargestellt werden, so dass Handlungen, die zusammengehörige Teilprobleme adressieren, auch zusammen instruiert werden. Eine weitere Anforderung ist die Erklärbarkeit von Plänen, die dem Nutzer die Möglichkeit gibt, den Sinn einer dargestellten Handlungsempfehlung zu erfragen.

All diese Anforderungen werden durch die Dissertation adressiert. Zunächst wird der gewählte Planungsansatz, *hybrides Planen*, welches hierarchisches Planen mit nicht-linearem Planen verbindet, theoretisch analysiert. Hierfür wird ein neuer Formalismus vorgestellt, der sich bereits zu einem akzeptierten Standard etablieren konnte. Darauf basierend wurde eine Kategorisierung der untersuchten Problemklassen vorgenommen und neue Komplexitätsergebnisse in den resultierenden Subklassen erzielt, darunter auch erstmals Ergebnisse zum Planexistenz- und Planverifikationsproblem des hybriden Planens (siehe Kapitel 2). Es werden die ersten zulässigen Heuristiken für hybrides Planen und dessen Subklassen vorgestellt, die – erstmals – das Finden optimaler Lösungen für die jeweiligen Klassen durch heuristische Suche erlauben (siehe Kapitel 3). Als Proof-of-Concept wird ein prototypisches *Companion-System* vorgestellt, das seine Nutzer beim Aufbau einer Heimkinoanlage unterstützt und hierbei weitere Planungsfähigkeiten umsetzt wie Planerklärung, Planreparatur und die plausible Linearisierung nicht-linearer Pläne (siehe Kapitel 4). Kapitel 5 fasst die Hauptergebnisse nochmals zusammen.

## 2 Theoretische Grundlagen

Als Grundlage der Untersuchungen der vorgestellten Doktorarbeit wird ein hierarchischer Planungsansatz gewählt. Wie in Kapitel 4 näher ausgeführt, ergeben sich hieraus einige Vorteile im vorliegenden Kontext der Assistenzsysteme, die sich über alle Ebenen des Anwendungskontexts erstreckt: sie kann für Modellierungsunterstützung ausgenutzt werden, für eine zielgerichtete Suche, für die Generierung von Erklärungen, und auch bei der Präsentation des Plans selbst.

Als Formalismus wird das sogenannte *hybride Planen* gewählt, ein hierarchischer Planungsansatz, der zwei traditionelle Ansätze kombiniert, nämlich das HTN-Planen mit dem POCL-Planen<sup>1</sup>. Das hybride Planen wurde bereits vor dieser Dissertation entwickelt [KMS98, BS01], aber die Dissertation stellt eine neue Formalisierung hiervon vor [Be16]. Diese Formalisierung geht in größten Teilen auf eine neue Formalisierung von HTN-Problemen zurück, welche ebenfalls ein Hauptbeitrag der Dissertation darstellt [GB11]. Diese neue Formalisierung dient seit ihrer Einführung 2011 bereits in zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen als Grundlage (auch von verschiedenen externen Forschergruppen) und kann daher als neuer etablierter Standard betrachtet werden. Aus Platzgründen sei für eine Auflistung der entsprechenden Arbeiten (bis etwa Mitte 2017) auf Kapitel 2 der Dissertation verwiesen [Be18].

<sup>1</sup> Dabei steht HTN für *Hierarchical Task Network* und POCL für *Partial-Order Causal-Link*.

Da die Formalisierung des hybriden und HTN-Planens einen Hauptbeitrag der Dissertation darstellt, wird sie hier auszugswise vorgestellt. Wir beginnen mit dem nicht-hierarchischen (d.h. *primitiven*) Anteil, dessen Formalisierung zu allgemein bekannten Grundlagen zählt. Ein nicht-hierarchisches Planungsproblem ist ein Tupel  $\mathcal{P} = \langle \mathcal{D}, s_0, g \rangle$ , bestehend aus der Planungsdomäne  $\mathcal{D} = \langle V, A \rangle$ , welche die zur Verfügung stehende Aktionsmenge beschreibt, dem Anfangszustand  $s_0$  und der Zielzustandsbeschreibung  $g$ . Das Modell ist ein rein propositionales, das auf einer endlichen Menge von Zustandsvariablen  $V$  beruht. Hierdurch wird implizit die Menge der möglichen Zustände  $2^V$  definiert, wobei  $s_0 \in 2^V$  dem Zustand vor der Ausführung eines Plans entspricht und  $g = (g^+, g^-)$  mit  $g^+, g^- \subseteq V$  die Menge der erwünschten Zielzustände beschreibt: Ein Zustand  $s \in 2^V$  ist genau dann ein Zielzustand, wenn  $s \supseteq g^+$  und  $s \cap g^- = \emptyset$  gilt. Aktionen überführen Zustände ineinander. Sie sind Tupel  $(pre^+, pre^-, eff^+, eff^-) \in (2^V)^4$ , bestehend aus den positiven und negativen Vorbedingung (preconditions)  $pre^+$  und  $pre^-$  und den positiven und negativen Effekten  $eff^+$  und  $eff^-$ . Eine solche Aktion ist genau dann in einem Zustand  $s \in 2^V$  ausführbar, falls  $s \supseteq pre^+$  und  $s \cap pre^- = \emptyset$  gelten. Ist dies der Fall, ist der Folgezustand definiert als  $s' := (s \setminus eff^-) \cup eff^+$ . Eine Lösung eines nicht-hierarchischen Planungsproblems  $\mathcal{P}$  ist dann eine Aktionssequenz, die in einen Zielzustand resultiert und deren Aktionen in ihrem jeweiligen Vorgängerzustand anwendbar sind, beginnend in  $s_0$ .

Unter hierarchischem Planen versteht man eine Problemklasse, die zusätzliche Anforderungen an Lösungen stellt. Es handelt sich also nicht um eine andere Art des Planens zum Finden von Lösungen, sondern um eine ausdrucksmächtigere Problemklasse, mit der man auch bestimmte Pläne *ausschließen* kann. Zu diesem Zweck werden die Aktionen der Planungsdomäne um eine Hierarchie ergänzt. In diesem neuen Kontext wird nun von Tasks gesprochen: *Primitive Tasks* sind die bereits bekannten Aktionen. *Abstrakte Tasks* hingegen müssen erst in primitive verfeinert werden. Hierfür enthält das Modell für jeden abstrakten Task eine Menge von *Dekompositionsmethoden*, welche Abbildungen auf vordefinierte *Tasknetzwerke* (kurz: *Tasknetze*) darstellen, die als Standardimplementierungen der abstrakten Tasks angesehen werden können [Be16]. Tasknetzwerke sind partiell geordnete Mengen von Tasks, die auch wiederum abstrakt sein können. In der vorgestellten Formalisierung des HTN-Planens sind sie wie folgt definiert:

**Definition 2.1.** Ein Tasknetzwerk  $tn = (T, \prec, \alpha)$  ist ein 3-Tupel, bestehend aus:

- $T$ , einer endlichen Menge sogenannter Task-Identifizierungssymbole,
- $\prec \subseteq T \times T$ , einer strikten Partialordnung über  $T$  und
- $\alpha : T \rightarrow N$ , wobei  $N$  eine endliche Menge von Tasknamen ist.

Zu beachten ist, dass abstrakte Tasks nur aus einem Namen aus  $N$  bestehen (denn ihr einziger Sinn ist ihre Verfeinerung durch eine Methode) und jeder primitive Task hat ebenfalls einen Namen, der als aussagekräftige Beschreibung statt des entsprechenden Aktionstupels verwendet werden kann. Eine Dekompositionsmethode ist nun ein 2-Tupel  $(n, tn)$ , wobei  $n$  der Name eines abstrakten Tasks und  $tn$  ein Tasknetzwerk, in das  $n$  verfeinert werden kann. Gegeben ein Tasknetzwerk  $tn = (T, \prec, \alpha)$ , ein abstrakter Task  $n = \alpha(t)$ , mit  $t \in T$  und eine Dekompositionsmethode  $m = (n, tn')$ , so ergibt sich aus der Anwendung von  $m$  auf  $tn$  ein neues Tasknetzwerk  $tn''$ , in welchem der Task  $n$  durch  $tn'$  ersetzt und die vorliegenden Ordnungsconstraints entsprechend vererbt werden [GB11].

Eine Lösung ist nun definiert als ein Tasknetzwerk, für das im Wesentlichen zwei Eigenschaften erfüllt sind: (1) es muss ausführbar sein, d.h. es besitzt eine Linearisierung seiner Aktionen, die den Startzustand in einen Zielzustand überführt und (2) es muss durch Anwendung einer Sequenz von Dekompositionsmethoden aus dem *initialen* Tasknetzwerk generierbar sein, welches Teil der hierarchischen Problembeschreibung  $\mathcal{P}$  ist [GB11]. Dieser Formalismus besteht durch zwei wesentliche Punkte: er ist simplistisch, d.h. ohne komplizierte und unnötige Definitionen, und trotzdem vollständig und formal korrekt. Zweitens nennt er *explizit* die Lösungskriterien, was zuvor nur selten bis gar nie in ausreichendem Maße gemacht wurde, was zu einer Fehlinterpretation der Semantik und entsprechend zu einer unzureichenden oder gar falschen Einordnung in die Literatur führen konnte – insbesondere von hierarchischen Planungsalgorithmen [Be18].

Diese Formalisierung für HTN-Plänen [GB11] wurde erweitert auf eine neue Formalisierung für hybrides Planen [Be16]. Im hybriden Planen werden Tasknetzwerke als Pläne bezeichnet und die Task-Identifizierungssymbole als Planschritte. Es unterscheidet sich vom HTN-Plänen dadurch, dass auch abstrakte Tasks Vorbedingung und Effekte besitzen – dies erlaubt u.a. das direkte Schlussfolgern auf höheren Abstraktionsebenen. Weiter können sämtliche Pläne des Domänenmodells kausale Links enthalten. Ein kausaler Link ist ein Tupel  $(ps, v, ps')$ , der annotiert, dass die Vorbedingungsvariable  $v$  des Planschritts  $ps'$  durch den Planschritt  $ps$  geschützt wird. Durch die angepassten Lösungskriterien wird garantiert, dass dieser „Schutz“ der kausalen Links auch eingehalten wird. Sowohl die Vorbedingungen und Effekte der abstrakten Tasks, als auch die in den Dekompositionsmethoden vorliegenden kausalen Links werden für die Definition sogenannter Legalitätskriterien benutzt, die bestimmen, ob Dekompositionsmethoden auch tatsächlich Implementierungen ihrer abstrakten Tasks sind [Be16]. In der Dissertation wird ein neues Implementierungskriterium vorgestellt, bestehende aus der Literatur in einem einheitlichen Formalismus dargestellt, ihr Einfluss auf Komplexitätseigenschaften dargelegt (siehe unten), und diskutiert, wie diese zur Modellierungsunterstützung genutzt werden können [Be16].

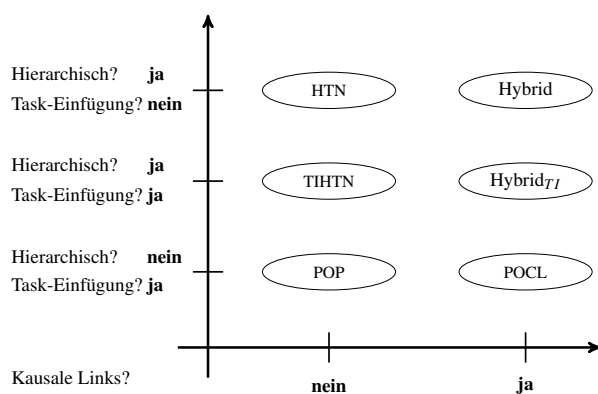


Abb. 1: Übersicht der untersuchten Problemklassen. Die Kategorisierung hängt davon ab, ob der initiale Plan oder irgend ein Plan irgend einer Methode kausale Links enthalten darf; davon, ob der initiale Plan abstrakte Tasks enthält; und davon, ob Task-Einfügung erlaubt ist.

Durch die vereinheitlichte Formalisierung wurde eine Kategorisierung der verschiedenen Problemklassen ermöglicht (für eine Übersicht siehe Abb. 1) und hierdurch eine systematische Betrachtung der theoretischen Eigenschaften der resultierenden Problemklassen.

Erst durch die neue Formalisierung des hybriden Planens war es möglich, eine Vielzahl der Komplexitätsergebnisse des HTN-Planens [ABA15a] auf hybrides Planen zu übertragen [Be16]. Zuvor waren *sämtliche* Komplexitätsergebnisse unbekannt. Es konnte bewiesen werden, dass das hybride Planen im allgemeinen Fall (d.h. ohne zusätzliche Einschränkungen wie beispielsweise total geordnete Pläne in den Methoden) exakt so ausdrucksmächtig ist wie HTN-Planen: Das Planexistenzproblem („Wie schwierig ist es, zu beweisen, ob eine Lösung existiert?“) ist sowohl **unentscheidbar** als auch **semi-entscheidbar**. Weiter konnte durch eine allgemeine Reduktion gezeigt werden, dass viele bekannte Spezialfälle des hybriden Planens genauso schwierig sind wie im entsprechenden HTN-Fall. Membership-Beweise sind in Arbeit. Weiter wurde bewiesen, dass auch die Planverifikation („Ist der vorliegende Plan eine Lösung für das Planungsproblem?“) genauso schwierig ist wie im HTN-Planen: Es ist **NP-vollständig**.

Auch im HTN-Planen wurden grundlegend neue und einflussreiche Ergebnisse erzielt. So erstmals systematisch untersucht, welchen Einfluss es nimmt, Tasknetze nicht nur durch Dekomposition abstrakter Tasks verfeinern zu dürfen – wie es im HTN-Planen üblich ist; vgl. Lösungskriterium (2) – sondern auch durch das Einfügen primitiver Aktionen, z.B., um Vorbedingungen anderer Aktionen zu schützen. Es wurde gezeigt, dass hierdurch die Komplexität des Planexistenzproblems von **unentscheidbar** auf **EXPSpace** membership sinkt [GB11]. Hierdurch wurde eine prinzipiell neuartige Problemrelaxierung entdeckt, die Entscheidbarkeit herbeiführt. Die daraus resultierende Problemklasse, genannt TIHTN-Planen (HTN-Planen mit Task Insertion) wurde in der Folge für weitere theoretische Untersuchungen aufgegriffen [AI14, ABA15b, Hö16], auch von anderen Forschergruppen. Dabei hat sich diese neue Problemrelaxierung insbesondere als Grundlage für Heuristiken als praktikabel erwiesen [AI14, Be17a].

Auch im POCL-Planen wurden neue Grundlagenergebnisse erzielt. Für die Entwicklung von Heuristiken im POCL-Planen ist es essentiell, die Ursache für die Schwierigkeit des Planexistenzproblems für einen gegebenen partiellen Plan zu kennen. Dennoch waren vor Veröffentlichung unserer Ergebnisse nur unzureichende theoretische Untersuchungen dieses Problems vorliegend. Wir konnten zeigen, dass im allgemeinen Fall das Planexistenzproblem für einen POCL-Plan **PSPACE-vollständig** ist [Be18]. Sehr viel interessanter und daher bedeutender ist jedoch die Erkenntnis, dass das Problem noch immer **NP-vollständig** ist, wenn sämtliche Aktionen – sowohl im aktuellen Plan als auch im Domänenmodell – nur positive Vorbedingungen haben und die Aktionen im Domänenmodell darüber hinaus delete-relaxiert sind, d.h. auch keine negativen Effekte haben [Be13]. Dieses Ergebnis ist deswegen so interessant, da die analoge Frage im klassischen Planen, wo die Heuristik für einen Zustand statt für einen Plan evaluiert wird, ein in **P** entscheidbares Problem ist. Dies zeigt die besondere Rolle der partiellen Ordnung von Aktionen auf und gibt damit Hinweise für die Entwicklung von Heuristiken im POCL- und hybriden Planen.

### 3 Suche und Heuristiken

Der Einsatz von Planungstechnologie mit einem Menschen im Mittelpunkt lässt im Kontext des Lösens der vorliegenden Probleme zwei Anforderungen von zentraler Bedeu-

tung werden: Laufzeit und Qualität der Lösungen. Wenn ein Mensch von einem Assistenzsystem Unterstützung sucht, möchte er *umgehend* unterstützt werden – es ist kaum Verständnis für lange Wartezeiten zu erwarten. Gleichzeitig sollten die Lösungen auch plausibel sein. Ein Nutzer wäre sicherlich sehr verwundert darüber, eine Instruktion präsentiert zu bekommen, die durch die nächste oder übernächste Instruktion gleich wieder rückgängig gemacht wird. Es sollten daher *gute* Lösungen gefunden werden.

Die Dissertation stellt zunächst einen Algorithmus zum Lösen hybrider Planungsprobleme vor [BKB14]. Dieser Algorithmus ist eine Weiterentwicklung – mit beachtlichen Laufzeitverbesserungen – des bis dahin als State-of-the-Art geltenden Planungssystems zum dekompositionsbasierten Lösen von Planungsproblemen [Be18]. Da hybride Planungsprobleme eine Erweiterung von HTN-Problemen um POCL-Konzepte darstellen, kann der entsprechende Planer neben hybriden Problemen auch HTN-Probleme, TIHTN-Probleme, POCL-Probleme und klassische Planungsprobleme lösen. Zur Laufzeitverbesserung wurden eine Reihe neuer Heuristiken entwickelt.

Als Grundlage für Heuristiken im hierarchischen Planen wurde der Task-Dekompositions-Graph (TDG) entwickelt, eine Repräsentation der Aktionshierarchie [El12, Be17a]. Eine dieser Heuristiken nutzt *Landmarken*, um den Verfeinerungsaufwand eines Suchknotens zu schätzen [BKB14]. Landmarken sind Tasks, die durch Verfeinerung eines bestimmten abstrakten Tasks in jedem Fall in einen Plan eingefügt werden. Im nächsten Schritt wurden diese Heuristiken verallgemeinert, um auch in Abwesenheit von Landmarken informiert zu agieren: Sie nutzen die dem TDG zugrundeliegende UND/ODER-Struktur aus, indem der Aufwand von Tasks in derselben Methode aufsummiert wird, während der Aufwand eines abstrakten Tasks zur Minimierung über seine Methoden geschätzt werden kann [Be17a]. Diese Heuristiken zählen zu den ersten wohlinformierten Heuristiken im HTN- und hybriden Planen. Zuvor wurde für die Heuristikberechnung entweder die Aktionshierarchie nicht hinreichend betrachtet oder es wurden gleich gänzlich keine Heuristiken zur Suchsteuerung verwendet; stattdessen musste eine Suchstrategie in das Modell kodiert werden [Be18]. Die vorgestellten Heuristiken sind außerdem zulässig, d.h. mit einem entsprechenden Algorithmus wie  $A^*$  garantieren sie das Finden optimaler Lösungen. Dies war vor dieser Arbeit nur durch hartkodierte Heuristikinformation oder durch uninformierte Suche möglich (d.h. mit uniformer Kostensuche).

Auch im POCL-Planen wurden neue Heuristiken entwickelt. Die erste Heuristik, *sampleFF*, approximiert das **NP-schwierige** Entscheidungsproblem der delete-relaxierten Probleme (siehe letztes Kapitel) durch das Samplen einer fixen Anzahl von Linearisierungen eines gegebenen Plans [Be13]. Aufgrund hoher Laufzeiten ist diese Heuristik nicht kompetitiv mit dem State-of-the-Art in Bezug auf gelöste Probleminstanzen auf einem Standard-Benchmarkset. Da sie aber mehr Informationen über die vorliegenden Pläne nutzt als andere Heuristiken, war sie die einzige, die ein unlösbares Problem als unlösbar beweisen konnte. Eine zweite „Heuristik“ beruht auf einer Kodierung eines Plans in ein neues Modell [BGB13]. Hierdurch kann sie Heuristiken aus dem klassischen Planen zugänglich machen, die den Zielabstand für *Zustände* schätzt. Zulässige zustandsbasierte Heuristiken sind aufgrund der Kodierungseigenschaften auch im POCL-Planen zulässig und erlauben damit – zum ersten Mal im POCL-Planen – das heuristische Suchen *optimaler* Pläne.

## 4 Praktische Anwendung

Das schnelle Finden guter oder optimaler Lösungen ist für die Nutzung eines tatsächlich eingesetzten Assistenzsystems zwar eine wichtige Voraussetzung, doch in der Praxis ergeben sich weitere Anforderungen an die Handlungsplanung. Wir konnten insbesondere die Fähigkeiten der Planerklärung, Planausführungsüberwachung mit Planreparatur sowie die adäquate Präsentation der Pläne selbst identifizieren [Bi11, Be17b].

Während die Planreparatur und die Fähigkeiten zur Planerklärung bereits vor dieser Dissertation durch Kollegen erforscht wurden, ist die sogenannte *Planlinearisierung* ein weiterer Beitrag der Dissertation [Be17b]. Hierbei handelt es sich um domänenunabhängige Strategien, die nutzerfreundliche Linearisierungen erzeugen. Als Eingabe dient ein Lösungsplan, also ein nicht-linearer Plan, der garantiert, dass jede Linearisierung ausführbar ist und sämtliche Nutzerziele erfüllt. Dennoch könnten einige Linearisierungen für Menschen (un)intuitiver sein als andere. Es ist die Aufgabe der Linearisierungskomponente, solche Linearisierungen zu bevorzugen, die menschliche Nutzer intuitiv erscheinen.

Ein weiterer Beitrag ist die Operationalisierung der genannten nutzerzentrierten Planungsfähigkeiten im Kontext von *Companion-Systemen*. Hierzu wurde mit zahlreichen Kollegen verschiedener Institute der Universität Ulm ein prototypisches *Companion-System* realisiert. Das System unterstützt seinen Nutzer bei der Verkabelung einer Heimkinoanlage und realisiert hierfür alle genannten nutzerzentrierten Planungsfähigkeiten [Be14, Be15, Be17c]. Eine portable Version des Assistenten [Be15] wurde an verschiedenen KI-Konferenzen vorgestellt, darunter an der ICAPS '14 und der AAAI '15. An der AAAI wurde das entsprechende Papier als eines von fünf Papieren ausgewählt, das an einer Pressekonferenz vorgestellt werden durfte, um es so einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Nominierungs- und Auswahlkriterium war der Nutzen für die Gesellschaft.

Im gewählten Beispielszenario des Assistenten besteht diese Heimkinoanlage aus einem Fernseher, einem Audio/Video-Verstärker, an welchen die Boxen angeschlossen sind, sowie einem Satellitenempfänger und einem Blu-ray-Player. Zur Verkabelung stehen dem Nutzer eine Vielzahl von Kabeln und Adaptern zur Verfügung. Diese Aufgabe wurde als Planungsproblem modelliert. Neben diesem formalen Modell der verwendeten Hardware (Geräte, Kabel, etc.) liegen dem System zahlreiche Bilder und Videos hiervon vor. Diese werden als Grundlage verwendet, um dem Nutzer eine detaillierte Schritt-für-Schritt-Anleitung zu präsentieren, die zuvor vollautomatisch basierend auf den Modellen erstellt wurde. Während das System zwar für ein bestimmtes Anwendungsszenario implementiert wurde, ist die zugrundeliegende Architektur domänenunabhängig und in vielen Szenarien einsetzbar [Be14].

## 5 Conclusion

Die Dissertation beschäftigt sich mit dem hybriden Planungsformalismus – von der Theorie zur Praxis. Hybrides Planen ist eine Fusionierung von HTN-Planen (ein hierarchischer Planungsansatz) mit POCL-Planen (ein nicht-lineares Planungsverfahren, das auf der ex-

pliziten Repräsentation von Kausalzusammenhängen in Plänen basiert). Die Arbeit untersucht, ob und wie der Formalismus als Grundlage für flexible und intelligente Assistenten eingesetzt werden kann. Im Kontext solcher *Companion-Systeme* [Bi16] werden von Theorie bis Praxis verschiedene Ergebnisse erzielt, die nachfolgend dargestellt werden.

Als eines der Hauptergebnisse wurde eine neue Formalisierung von HTN-Planungsproblemen eingeführt [GB11]. Sie ist besonders gut zum Führen von Beweisen formaler Eigenschaften geeignet und wurde insbesondere zu diesem Zweck bereits oft aufgegriffen [Be18]. Durch ihre Erweiterung auf hybrides Planen konnten außerdem die ersten Komplexitätsergebnisse für hybrides Planen nachgewiesen werden [Be16]. Es ist im allgemeinen Fall **unentscheidbar** und auch in vielen Spezialfällen (z.B. wenn alle Pläne total geordnet sind) mindestens so schwierig wie HTN-Plänen. Die Verifikation, ob ein Plan eine Lösung ist, ist **NP-vollständig**, wie auch im HTN-Plänen. Neue Komplexitätsergebnisse wurden außerdem in den Bestandteilen des hybriden Formalismus erzielt. Es konnte gezeigt werden, dass die Fähigkeit der Task-Einfügung (hier dürfen beliebig Tasks in Tasknetze eingefügt werden; nicht nur durch die Dekomposition von abstrakten Tasks wie sonst üblich) das **unentscheidbare** HTN-Planexistenzproblem **entscheidbar** macht [GB11]. Hierdurch wurde eine prinzipiell neuartige Form der Problemrelaxierung geschaffen, die einerseits theoretisch von Bedeutung ist, andererseits aber auch praktische Konsequenzen hat, z.B. zur Heuristikberechnung. Für das POCL-Planen wurden die ersten Komplexitätsergebnisse nachgewiesen [Be13]. Es wurde insbesondere bewiesen, dass Delete-Relaxierung der Aktionen im Domänenmodell das sonst **PSPACE-vollständige** Planexistenzproblem **NP-vollständig** macht.

Zur Lösung aller abgedeckten Problemklassen wurde ein effizienter heuristischer Suchalgorithmus vorgestellt [BKB14]. Zum Lösen von POCL-Problem wurden neue Heuristiken entwickelt [Be13, BGB13], darunter ein Ansatz, der basierend auf einer Problemtransformation Heuristiken aus dem zustandsbasierten Planen zugänglich macht [BGB13]. Durch ihn wurden die ersten zulässigen Heuristiken im POCL-Planen erzielt, welche das Finden optimaler Lösungen ermöglicht. Es wurden auch neue Suchstrategien und Heuristiken für das HTN- und hybride Planen entwickelt [El12, Be17a]. Eine dieser Heuristiken ist die erste zulässige Heuristik für diese Klassen und erlaubt daher erstmals das Finden optimaler Lösungen durch heuristische Suche [Be17a].

Es wurde ein prototypisches *Companion-System* entwickelt [Be14, Be15, Be17c]<sup>2</sup>, das als Proof-of-Concept veranschaulicht, wie nutzerzentrierte Planungsfähigkeiten wie Reparatur, Erklärung und Planlinearisierung in einem praktisch eingesetzten System operationalisiert werden können und hierdurch flexibel seine Nutzer unterstützt [Bi11, Be17b].

## Danksagung

Ich danke meiner Doktor Mutter Prof. Dr. Susanne Biundo-Stephan, mir die Möglichkeit zur Promotion in einem gesellschaftlich relevanten Gebiet zu ermöglichen zu haben, wel-

<sup>2</sup> Das zitierte Buchkapitel [Be17c] ist in der Dissertation nicht als Hauptbeitrag hervorgehoben. Es wird hier insbesondere zitiert, da es die Einzelbeiträge der verschiedenen Autorengruppen am Gesamtsystem darstellt.



ches trotz des praktischen Anwendungskontexts auch intensive theoretische Untersuchungen erlaubt. Der Universität Ulm danke ich für die Nominierung zum GI-Dissertationspreis.

## Literatur

- [ABA15a] Alford, Ron; Bercher, Pascal; Aha, David: Tight Bounds for HTN Planning. In: Proc. of the 25th Int. Conf. on Automated Planning and Scheduling (ICAPS). AAAI Press, S. 7–15, 2015.
- [ABA15b] Alford, Ron; Bercher, Pascal; Aha, David: Tight Bounds for HTN planning with Task Insertion. In: Proc. of the 25th Int. Joint Conf. on AI (IJCAI). AAAI Press, S. 1502–1508, 2015.
- [AI14] Alford, Ron; Shivashankar, Vikas; Kuter, Ugur; Nau, Dana: On the Feasibility of Planning Graph Style Heuristics for HTN Planning. In: Proc. of the 24th Int. Conf. on Automated Planning and Scheduling (ICAPS). AAAI Press, S. 2–10, 2014.
- [Be13] Bercher, Pascal; Geier, Thomas; Richter, Felix; Biundo, Susanne: On Delete Relaxation in Partial-Order Causal-Link Planning. In: Proc. of the 2013 IEEE 25th Int. Conf. on Tools with AI (ICTAI). IEEE Computer Society, S. 674–681, 2013.
- [Be14] Bercher, Pascal; Biundo, Susanne; Geier, Thomas; Hörnle, Thilo; Nothdurft, Florian; Richter, Felix; Schattenberg, Bernd: Plan, Repair, Execute, Explain - How Planning Helps to Assemble your Home Theater. In: Proc. of the 24th Int. Conf. on Automated Planning and Scheduling (ICAPS). AAAI Press, S. 386–394, 2014.
- [Be15] Bercher, Pascal; Richter, Felix; Hörnle, Thilo; Geier, Thomas; Höller, Daniel; Behnke, Gregor; Nothdurft, Florian; Honold, Frank; Minker, Wolfgang; Weber, Michael; Biundo, Susanne: A Planning-based Assistance System for Setting Up a Home Theater. In: Proc. of the 29th AAAI Conference on AI (AAAI). AAAI Press, S. 4264–4265, 2015.
- [Be16] Bercher, Pascal; Höller, Daniel; Behnke, Gregor; Biundo, Susanne: More than a Name? On Implications of Preconditions and Effects of Compound HTN Planning Tasks. In: Proc. of the 22nd Europ. Conf. on AI (ECAI). IOS Press, S. 225–233, 2016.
- [Be17a] Bercher, Pascal; Behnke, Gregor; Höller, Daniel; Biundo, Susanne: An Admissible HTN Planning Heuristic. In: Proc. of the 26th Int. Joint Conf. on AI (IJCAI). AAAI Press, S. 480–488, 2017.
- [Be17b] Bercher, Pascal; Höller, Daniel; Behnke, Gregor; Biundo, Susanne: User-Centered Planning. In Biundo; Wendemuth, A. [BW17], 2017. Kapitel 5, S. 79–100.
- [Be17c] Bercher, Pascal; Richter, Felix; Hörnle, Thilo; Geier, Thomas; Höller, Daniel; Behnke, Gregor; Nothdurft, Florian; Honold, Frank; Schüssel, Felix; Reuter, Stephan; Minker, Wolfgang; Weber, Michael; Dietmayer, Klaus; Biundo, Susanne: Advanced User Assistance for Setting Up a Home Theater. S. 485–491. In Biundo; Wendemuth, A. [BW17], S. 485–491, 2017. Kapitel 24, S. 485–49.
- [Be18] Bercher, Pascal: Hybrid Planning — From Theory to Practice. Dissertation, Ulm University, 2018. doi: 10.18725/OPARU-5242.
- [BGB13] Bercher, Pascal; Geier, Thomas; Biundo, Susanne: Using State-Based Planning Heuristics for Partial-Order Causal-Link Planning. In: Advances in AI, Proceedings of the 36th German Conference on AI (KI). Springer, S. 1–12, 2013.

- [Bi11] Biundo, Susanne; Bercher, Pascal; Geier, Thomas; Müller, Felix; Schattenberg, Bernd: Advanced user assistance based on AI planning. *Cognitive Systems Research*, 12(3-4):219–236, April 2011. Special Issue on Complex Cognition.
- [Bi16] Biundo, Susanne; Höller, Daniel; Schattenberg, Bernd; Bercher, Pascal: Companion-Technology: An Overview. *Künstliche Intelligenz*, 30(1):11–20, 2016.
- [BKB14] Bercher, Pascal; Keen, Shawn; Biundo, Susanne: Hybrid Planning Heuristics Based on Task Decomposition Graphs. In: *Proc. of the 7th Annual Symposium on Combinatorial Search (SoCS)*. AAAI Press, S. 35–43, 2014.
- [BS01] Biundo, Susanne; Schattenberg, Bernd: From Abstract Crisis to Concrete Relief – A Preliminary Report on Combining State Abstraction and HTN Planning. In: *Proc. of the 6th Europ. Conf. on Planning (ECP)*. AAAI Press, S. 157–168, 2001.
- [BW16] Biundo, Susanne; Wendemuth, Andreas: *Companion-Technology for Cognitive Technical Systems*. *Künstliche Intelligenz*, 30(1):71–75, 2016.
- [BW17] Biundo, Susanne; Wendemuth, Andreas: *Companion Technology – A Paradigm Shift in Human-Technology Interaction*. *Cognitive Technologies*. Springer, 2017.
- [El12] Elkwakagy, Mohamed; Bercher, Pascal; Schattenberg, Bernd; Biundo, Susanne: Improving Hierarchical Planning Performance by the Use of Landmarks. In: *Proc. of the 26th AAAI Conf. on Artificial Intelligence (AAAI)*. AAAI Press, S. 1763–1769, 2012.
- [GB11] Geier, Thomas; Bercher, Pascal: On the Decidability of HTN Planning with Task Insertion. In: *Proc. of the 22nd Int. Joint Conf. on AI (IJCAI)*. AAAI Press, S. 1955–1961, 2011.
- [Hö16] Höller, Daniel; Behnke, Gregor; Bercher, Pascal; Biundo, Susanne: Assessing the Expressivity of Planning Formalisms through the Comparison to Formal Languages. In: *Proc. of the 26th Int. Conf. on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)*. AAAI Press, S. 158–165, 2016.
- [KMS98] Kambhampati, Subbarao; Mali, Amol; Srivastava, Biplav: Hybrid Planning for Partially Hierarchical Domains. In: *Proc. of the 15th Nat. Conf. on AI (AAAI)*. AAAI Press, S. 882–888, 1998.



**Pascal Bercher**, Jahrgang '82, studierte von 2002 bis 2009 an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau Informatik (Diplom) mit Spezialisierung Künstliche Intelligenz und Nebenfach Kognitionswissenschaft. Mitte 2009 wechselte er zur Promotion bei Prof. Dr. Susanne Biundo-Stephan an das Institut für Künstliche Intelligenz der Universität Ulm. Hier arbeitete er im Sonderforschungsbereich SFB/TRR 62 „*Eine Companion-Technologie für kognitive technische Systeme*“. Er untersuchte, ob und wie man durch Planungstechnologie Assistenzsysteme realisieren kann. Schwerpunkte setzte

er bei der Erforschung theoretischer Grundlagen sowie von Heuristiken zur Laufzeitverbesserung der eingesetzten Suchalgorithmen. Seit seiner Promotion Ende 2017 beschäftigt sich Herr Bercher im Rahmen seiner Habilitation am selben Institut weiter mit der Verbindung von Theorie und Praxis im Kontext von intelligenten Assistenzsystemen. Seit Ende 2016 koordiniert er in diesem Kontext die Ulmer Arbeiten des aus dem SFB entstandenen Transferprojekts „*Do it yourself, but not alone: Companion-Technologie für die Heimwerkerunterstützung*“, welches in Kooperation mit dem Projektpartner Robert Bosch GmbH durchgeführt wird.