

NUTZUNGSORIENTIERTER KONZEPTUELLER GEBÄUDEENTWURF
—
MODELLIERUNGSMETHODE UND REALISIERUNGSANSATZ

VON DER FAKULTÄT FÜR ARCHITEKTUR
DER RHEINISCH-WESTFÄLISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE AACHEN
ZUR ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES EINES
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN
GENEHMIGTE DISSERTATION

VORGELEGT VON

MATTHIAS KLAUS FRANK

BERICHTER:

UNIV.-PROF. DIPL.-ING. PETER J. RUSSELL, M.ARCH.
PROF. DIPL.-ING. ARCH. CAROLIN STAPENHORST, PH.D.

TAG DER MÜNDLICHEN PRÜFUNG: 18.04.2018

DIESE DISSERTATION IST AUF DEN INTERNETSEITEN DER UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK ONLINE VERFÜGBAR.

KONTAKTDATEN DES AUTORS:

DIPL.-INFORM. MATTHIAS FRANK

E-MAIL: MATTHIAS.FRANK@RWTH-AACHEN.DE

Vorwort

Der Entwurf eines Gebäudes folgt Logiken, die die Wissenschaft der Architektur erkennt, in Diskursen reflektiert, bewertet und selektiert und der Praxis der Architektur als Ursprung und Ziel zum fortwährenden Erkenntnisgewinn verfügbar macht. So entstandene geordnete Regelwerke für die Gestaltung, die Konstruktion und technische Ausstattung von Gebäuden und die intelligente Anwendung prägen Bauwerke ihrer Zeit. Sie realisieren Anforderungen ihres Urhebers. Sie sind die Materialisierung des Ausschnittes angewandter Logik, die der Architekt für den Entwurf wählte. Welche Logik führt zum Entwurf eines Grundrisses, der gewünschte Nutzungen erfüllen soll?

„Form follows function“ (fff), im Deutschen als „Die Form (eines Gebäudes) leitet sich von seiner Funktion ab.“ gebraucht, ein Satz, der mit dem amerikanischen Architekten Louis Sullivan in Verbindung gebracht wird, kann hier dem Fragenden eine anerkannte Erklärung geben. Welche Logik repräsentiert der Materie gewordene Entwurf, der gewünschte Nutzungen erfüllen soll? Erfüllen vom Gebäude bereitgestellte Funktionen die Nutzungsanforderungen, so ist die Form demnach die Konsequenz der Logik von fff. Die Gestaltung der Form wird dominiert. Und doch zeigen Entwürfe etwa von Bürohäusern, dass die Gestaltung im Wettlauf um metropolitane Statussymbole hohe Freiheitsgrade in der Materialisierung des doch immer gleichen Nutzungszwecks hat.

Die Form scheint gar nicht so sehr festgelegt zu sein durch eine Funktion des Gebäudes. Vielmehr prägt die Anforderung an die Nutzung des Gebäudes die Anordnung der Funktionen im Gebäude und der Räume zueinander, die diese Funktionen anbieten. Die Abstraktion von Form hin zur Topologie eines Gebäudes, die bestimmt wird durch die geforderte Nutzung von angebotenen Funktionen, ist eine Antwort auf das Hinterfragen des Autors, die als Logik verstanden werden kann, dass die Topologie dem Nutzen folgt. „Topology follows usage“ erklärt, dass die Nutzungsanforderung selbstverständlich den Entwurf eines Gebäudes prägt, jedoch nicht direkt seine Form, sondern die Gebäudetopologie, welche ihrerseits eine Rahmenbedingung für die Gestaltung ist.

Die Existenz dieser Arbeit beruht auf Fügung, die dem Autor den Raum gab, das persönliche, gewachsene Interesse an der Beantwortung der Fragestellung in einen wissenschaftlichen Kontext zu stellen. Für diese Möglichkeit danke ich sehr Peter Russell, der meine damalige Bewerbung anhörte und mir die Gelegenheit gab, die selbstständige Ausarbeitung dieser Dissertation zu beginnen. Die ersten Ideen für die Modellierung von Gebäudetopologie und -nutzung diskutierte ich mit ihm, und er hat die prüfenden Fragen gestellt, die anspornten, aus einem spezifischen Prototypen die Modelle und den Realisierungsansatz zu abstrahieren, die hier vorgestellt werden. Carolin Stapenhorst hat geholfen, den Ansatz in die jüngere Entwurfstheorie einzuordnen und dadurch der vorgeschlagenen Methode eine wissenschaftlich herleitbare Existenzberechtigung zu geben. Für diese Orientierung und die Übernahme ihrer Berichterstattung danke ich sehr. Frau Ilga und Frau Müller danke ich für die Aufnahme am Lehrstuhl CAAD und Stanimira Markova für den Zugang zur dortigen Literatur.

Die vielleicht letztmalige Möglichkeit wahrzunehmen, eine wissenschaftliche Arbeit neben meiner anderen Erwerbstätigkeit zu verfassen, betrachte ich als großes Geschenk. Dem zeitlichen Verzicht auf mich, den meine Familie in dieser Zeit übte, möchte ich an dieser Stelle mit ebenso großem Dank begegnen. Dieser gilt meiner Frau, meinem Sohn und meiner Tochter. Auch guten Freunden, die zumindest therapeutisch zuhörten, wenn formale Hindernisse drohten, den Weg zu versperren, danke ich: Martin, Wolfgang, Volker und Sabine. Nicht zuletzt danke ich meinem Vater, der mir früher in Erzählungen aus seinem großen akademischen Fundus zur Architektur ein paar Grundlagen mitgab.

Matthias Frank im Mai 2018

1 Inhalt

1.1 Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	3
1 Inhalt.....	5
1.1 Inhaltsverzeichnis.....	5
1.2 Abbildungsverzeichnis.....	7
1.3 Tabellenverzeichnis.....	10
2 Einleitung.....	11
2.1 Benennung der Problemstellung.....	11
2.2 Motivation der Problemstellung anhand von Beispielen.....	12
2.3 Ziele für die Modellierungsmethode und den Realisierungsansatz.....	18
2.4 Zusammenfassung der Arbeit und Kapitelabfolge.....	20
3 Konzeptueller Gebäudeentwurf und Nutzungsorientierung	21
3.1 Konzeptueller Gebäudeentwurf.....	21
3.2 Nutzungsorientierung.....	26
3.3 Gebäude im Zusammenhang mit dem konzeptuellen Entwurf.....	29
3.4 Aktueller Stand der Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs.....	33
3.5 Zusammenfassung und Überleitung zur Modellierungsmethode.....	41
4 Modellierungsmethode.....	43
4.1 Einordnung in Basismethoden des Architekturentwurfs.....	44
4.2 Modellierungsgegenstand — Definition.....	47
4.2.1 Zusammenhang.....	47
4.2.2 Gebäudetopologie.....	48
4.2.3 Nutzung, Nutzer.....	49
4.2.4 Nutzungsfall.....	50
4.2.5 Gebäudenutzung.....	50
4.3 Bestimmung der methodischen Modellierungsbasis.....	51
4.3.1 Anforderungen an die Modellierungsbasis.....	51
4.3.2 Auswahl an Modellierungskonzepten.....	54
4.3.3 Bewertung ausgewählter Modellierungskonzepte.....	58
4.4 Modellierung mit Petrinetzen.....	67
4.4.1 Grundlagen.....	68
4.4.2 Für diesen Ansatz relevante Aspekte von Referenznetzen.....	71
4.4.3 Modellierung mit Petrinetzen in Architektur und Bauwirtschaft.....	76
4.4.4 Auswahl eines Petrinetztyps für die Modellierung der Gebäudenutzung.....	78
4.5 Neuartigkeit der Betrachtungsweise und Abgrenzung des vorgestellten Ansatzes.....	86
4.6 Zusammenfassung und Überleitung zur Modellierung.....	88

5 Modellierung der Gebäudenutzung zur Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs.....	89
5.1 Modellierungsgegenstand — Metamodellbildung.....	90
5.1.1 Metamodell Rahmenwerk und Spezifikation.....	96
5.1.2 Metamodell der Gebäudetopologie.....	97
5.1.3 Metamodell der Nutzung.....	109
5.1.4 Metamodell des Nutzungsfalls.....	116
5.1.5 Metamodell der Gebäudenutzung.....	124
5.2 Einordnung des Modells und Anknüpfungspunkte an BIM / IFC.....	133
5.3 Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs.....	141
5.3.1 Modell: Bezug zu den Modellierungsgegenständen und Erfüllung der Anforderungen.....	141
5.3.2 Methode: Einordnung in Basismethoden des Architekturentwurfs.....	147
5.3.3 Vorgehen: Modellierung mit dieser Methode.....	151
5.3.4 Verwendung: Vorgehen im nutzungsorientierten Gebäudeentwurf.....	154
5.4 Zusammenfassung.....	158
6 Verwendung in Beispielen.....	159
6.1 Verwendung im Entwurf am Beispiel eines Einfamilienhauses.....	159
6.2 Verwendung zur Diagnose am Beispiel einer Zahnarztpraxis.....	192
6.3 Verwendung in weiteren Beispielen.....	225
7 Ergebnisse und Perspektive.....	227
7.1 Ergebnisse.....	227
7.2 Ansätze für weitere Arbeiten.....	232
7.3 Beitrag zur Theorie und Praxis der Architekturinformatik.....	235
8 Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis.....	237
9 Literaturverzeichnis.....	239

1.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verwendung in der Diagnose — Grundriss für Bestandsprüfung, Beispiel.....	16
Abbildung 2: Gebäude im Zusammenhang mit dem konzeptuellen Entwurf.....	32
Abbildung 3: Petrinetz für das Erzeuger-Verbraucher-System.....	69
Abbildung 4: Speicher Room Place Definitions Memory.....	98
Abbildung 5: Speicher Room Capacity Memory.....	99
Abbildung 6: Speicher Room Allocation Memory.....	99
Abbildung 7: Speicher Current Room Place of Usecase.....	100
Abbildung 8: Raumfunktionstransition, Beispiel.....	100
Abbildung 9: Raumübergangstransitionen, Beispiel.....	101
Abbildung 10: Speicher Room Transition Definitions Memory.....	102
Abbildung 11: Room Transition and Room Use Definitions of the Building, Beispiel.....	103
Abbildung 12: Room Transition Type Definitions, Beispiel, Ausschnitt.....	103
Abbildung 13: Room Transition Barrier Definitions, Beispiele.....	103
Abbildung 14: Synonym Definitions, Beispiel.....	103
Abbildung 15: Modellierung besonderer Objekte der Gebäudetopologie.....	108
Abbildung 16: Regelwerk Room Transition Definitions.....	109
Abbildung 17: Speicher Current Transition Id.....	110
Abbildung 18: Speicher Current Transition Information.....	110
Abbildung 19: Speicher Room Access Definitions Memory (Transition Allowness Definitions).....	111
Abbildung 20: Speicher Room Use Definitions Memory.....	112
Abbildung 21: Regelwerk Room Joined Use.....	113
Abbildung 22: Regelwerk Room Joined Team Use (Scenario).....	115
Abbildung 23: Speicher User Role Definition Memory.....	116
Abbildung 24: Speicher Usecase ID Memory.....	116
Abbildung 25: Nutzungstopologie-Netz, Beispiel.....	117
Abbildung 26: Regelwerk Room Move Definition.....	118
Abbildung 27: Speicher Use Recording.....	118
Abbildung 28: Regelwerk Room Function Use and Move Definition.....	119
Abbildung 29: Speicher Room Use Orientation Memory.....	119
Abbildung 30: Regelwerk Room Function Use Definition.....	120
Abbildung 31: Spezifikation der Nutzungsabfolge in einem Nutzungsfall, Beispiel.....	122
Abbildung 32: activate-Transition.....	122
Abbildung 33: Usecase Activated Type Memory.....	122
Abbildung 34: Speicher Building Registration Memory.....	123
Abbildung 35: Regelwerk Save Use Recording.....	123
Abbildung 36: Regelwerk Use Recording File.....	123
Abbildung 37: Regelwerk Room Use Definition.....	127
Abbildung 38: Regelwerk Room Joined Use Definition.....	128

Abbildung 39: Regelwerk Room Joined Team Use Definition.....	128
Abbildung 40: Netz Room Transition and Room Use Definitions defined, Beispiel.....	129
Abbildung 41: Netz Room Access Definitions (Transition Allowness Definitions), Beispiel.....	130
Abbildung 42: Regelwerk zur Initiierung der Gebäudenutzung, Beispiel.....	131
Abbildung 43: Speicher Usecase Counter Memory.....	132
Abbildung 44: Einordnung und Anknüpfungspunkte an BIM / IFC.....	135
Abbildung 45: Methode auf Basis des Modells.....	147
Abbildung 46: Vorgehen: Modellierung mit dieser Methode.....	153
Abbildung 47: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 1.....	160
Abbildung 48: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 2.....	161
Abbildung 49: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 3.....	161
Abbildung 50: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 4.....	162
Abbildung 51: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 5.....	162
Abbildung 52: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Ausschnitt Gegenwart 1.....	165
Abbildung 53: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 1, Simulationsergebnis.....	166
Abbildung 54: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Ausschnitt Gegenwart 2.....	167
Abbildung 55: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 2, Simulationsergebnis.....	167
Abbildung 56: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Ausschnitt Gegenwart 3.....	168
Abbildung 57: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 3, Simulationsergebnis.....	169
Abbildung 58: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Ausschnitt Gegenwart 4.....	170
Abbildung 59: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 4, Simulationsergebnis.....	171
Abbildung 60: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Ausschnitt Gegenwart 5.....	172
Abbildung 61: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 5, Simulationsergebnis.....	173
Abbildung 62: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Zukunft 7.....	175
Abbildung 63: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Ausschnitt Zukunft 7.....	176
Abbildung 64: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Zukunft 7, Simulationsergebnis.....	177
Abbildung 65: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Zukunft 8.....	178
Abbildung 66: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Ausschnitt Zukunft 8.....	179
Abbildung 67: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Zukunft 8, Simulationsergebnis.....	180
Abbildung 68: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Nutzung "Morgens 61-62-63".....	181
Abbildung 69: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Spezifikationsnetz, Teil 1.....	182
Abbildung 70: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Spezifikationsnetz, Teil 2.....	183
Abbildung 71: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall "Morgens 61".....	184
Abbildung 72: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall "Morgens 61", Simulationsergebnis.....	185
Abbildung 73: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall "Morgens 62".....	186
Abbildung 74: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall "Morgens 62", Simulationsergebnis.....	187
Abbildung 75: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall "Morgens 63".....	188
Abbildung 76: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall "Morgens 63", Simulationsergebnis.....	189
Abbildung 77: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell und Grundriss.....	191

Abbildung 78: Verwendung in der Diagnose — Nutzungsfall 1 "Arzt".....	194
Abbildung 79: Verwendung in der Diagnose — Nutzungsfall 2 "Assistent".....	195
Abbildung 80: Verwendung in der Diagnose — Nutzungsfall 3 "Patient".....	195
Abbildung 81: Verwendung in der Diagnose — Nutzungsfall 4 "WC nutzbar".....	196
Abbildung 82: Verwendung in der Diagnose — Nutzungsfall 5 "Labor nutzbar".....	196
Abbildung 83: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Bestandspraxis, Grundriss.....	197
Abbildung 84: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Grundriss aus Abbildung 83, Topologie-Netz.....	198
Abbildung 85: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Topologie-Netz.....	199
Abbildung 86: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Spezifikationsnetz, Teil 1.....	200
Abbildung 87: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Spezifikationsnetz, Teil 2.....	201
Abbildung 88: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Start der Gebäudenutzung für Nutzungsfälle 1–3.....	203
Abbildung 89: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Simulation Nutzungsfall 1 verhindert.....	204
Abbildung 90: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Simulation Nutzungsfall 2 verhindert.....	205
Abbildung 91: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Umnutzung Hörtraum als Personalraum.....	206
Abbildung 92: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Nutzungsfall 3, Patient 1, Simulationsergebnis der Nutzungsfälle 1–3.....	207
Abbildung 93: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Nutzungsfall 3, Patient 2, Simulationsergebnis der Nutzungsfälle 1–3.....	208
Abbildung 94: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Nutzungsfall 3, Patient 3, Simulationsergebnis der Nutzungsfälle 1–3.....	209
Abbildung 95: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Start der Gebäudenutzung für den Nutzungsfall 4.....	210
Abbildung 96: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Simulation Nutzungsfall 4 verhindert.....	210
Abbildung 97: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Nutzungsfall 4, Zugangsberechtigung.....	211
Abbildung 98: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Nutzungsfall 4, Simulationsergebnis: WC genutzt.....	212
Abbildung 99: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Simulation Nutzungsfall 4 verhindert.....	213
Abbildung 100: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Abbau der Barriere zum WC.....	214
Abbildung 101: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Simulation Nutzungsfall 4: WC nutzbar.....	214
Abbildung 102: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Nutzungsfall 4, Simulationsergebnis: WC nutzbar.....	215
Abbildung 103: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Start der Gebäudenutzung für den Nutzungsfall 5.....	216
Abbildung 104: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Simulation Nutzungsfall 5 verhindert.....	216
Abbildung 105: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Simulation Nutzungsfall 5 verhindert.....	217
Abbildung 106: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Vergrößerung der Laborraumkapazität.....	218
Abbildung 107: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Simulation Nutzungsfall 5: Labor nutzbar.....	219
Abbildung 108: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Nutzungsfall 5, Simulationsergebnis: Labor nutzbar.....	220
Abbildung 109: Verwendung in der Diagnose — Änderungen für eine Zahnarztpraxis, Topologie-Netz.....	222
Abbildung 110: Verwendung in der Diagnose — Änderungen für eine Zahnarztpraxis, Spezifikationsnetz, Teil 1.....	223
Abbildung 111: Verwendung in der Diagnose — Änderungen für eine Zahnarztpraxis, Spezifikationsnetz, Teil 2.....	224

Die Abbildungen 1, 2, 83, 84, 89, 90, 96, 99, 104, 107 und 109 enthalten Bildzitate nach § 51 UrhG mit entsprechenden Quellenangaben im Sinne der Vervielfältigung, Verbreitung und öffentlichen Wiedergabe in einem durch den Zweck gebotenen Umfang, in einem selbstständigen wissenschaftlichen Werk zur Erläuterung des Inhalts dieser Arbeit.

1.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiel für Nutzungsanforderungen für den Entwurf eines Individualbaus.....	13
Tabelle 2: Beispiel für Nutzungsanforderungen für die Bestandsprüfung und Diagnose.....	16
Tabelle 3: Grundlage für die Einordnung der Modellierungsmethode in Basismethoden des Architekturentwurfs.....	47
Tabelle 4: Anforderungen an die Modellierungsmethode.....	54
Tabelle 5: Vorauswahl von Modellierungsmitteln der UML.....	56
Tabelle 6: Bewertung ausgewählter Modellierungskonzepte — Anforderungen bezüglich Modellierungsgegenständen.....	63
Tabelle 7: Bewertung ausgewählter Modellierungskonzepte bezüglich Basismethoden des Architekturentwurfs.....	66
Tabelle 8: Modellierung mit Petrinetzen in Architektur und Bauwirtschaft — Vergleich mit einem Beispiel zur Bauprozessmodellierung.....	77
Tabelle 9: Modellierung mit Petrinetzen in Architektur und Bauwirtschaft — Vergleich mit einem Beispiel zur Modellbildung eines kooperativen Straßenverkehrs mittels Petrinetzen.....	78
Tabelle 10: Auswahl eines Petrinetztyps für die Modellierung der Gebäudenutzung.....	83
Tabelle 11: Begründung der Auswahl von Referenznetzen.....	85
Tabelle 12: Neuartigkeit der Betrachtungsweise und Abgrenzung des vorgestellten Ansatzes.....	87
Tabelle 13: Modellierungsgegenstand — Metamodellbildung und Modellierung.....	96
Tabelle 14: Zugangsberechtigung: Beispiele für Anwendungen.....	96
Tabelle 15: Modellierung besonderer Objekte der Gebäudetopologie.....	107
Tabelle 16: Unterstützung integrierter Modellierung von Gebäudetopologie mit diesem Modell und Gebäuden mit BIM.....	140
Tabelle 17: Erfüllung der Anforderungen an die Modellierungsmethode.....	146
Tabelle 18: Einordnung der Methode in Basismethoden des Architekturentwurfs.....	150
Tabelle 19: Verwendung und Werkzeugunterstützung.....	157
Tabelle 20: Ergebnisse anhand der Ziele.....	231
Tabelle 21: Perspektive: Forschungs- und Entwicklungsprojekte.....	234

2 Einleitung

*„Eng ist die Welt, und das Gehirn ist weit,
Leicht beieinander wohnen die Gedanken,
Doch hart im Raume stoßen sich die Sachen ...“¹*

2.1 Benennung der Problemstellung

Der konzeptuelle Gebäudeentwurf führt zu Festlegungen für das Gebäude und seine Nutzung. In dieser frühen Phase getroffene Entwurfsentscheidungen legen die Nutzungsmöglichkeiten des Gebäudes fest. Diese bestimmen seine Nutzbarkeit, das heißt, in welchen Nutzungsfällen es genutzt werden kann. Die Nutzbarkeit bestimmt, neben anderen Eigenschaften wie der Gestaltung, energetischen Eigenschaften oder Baustoffwahl, den Wert eines Gebäudes. Daher ist die Erreichung einer hohen Nutzbarkeit ein wichtiges Entwurfsziel. Die Nutzbarkeit kann definiert werden als die durch das Gebäude erfüllte Unterstützung angeforderter Nutzungsprozesse, die aus einer Folge von Nutzungen von Funktionen und Bewegungen im umbauten Raum hin zu Funktionsangeboten bestehen. Die Nutzungsprozesse werden als Nutzungsfälle oder -szenarien meist textuell und auf Basis von Bauentwurfsstandards beschrieben. Die Anforderungen werden durch verschiedene Beteiligte definiert und vom Architekten in einen Entwurf überführt, der als 2D²- oder BIM³-gestützter Entwurf erfolgt und einen Schwerpunkt in der Raumplanung bzw. Grundrissgestaltung hat. Es werden Entwurfsentscheidungen getroffen, die die Nutzbarkeit betreffen können. Eine formale Überprüfung von Nutzungsanforderungen ist gegenwärtig auf spezielle Nutzungsfälle wie Fluchtwegplanung oder Barrierefreiheit fokussiert und setzt ein BIM oder andere spezielle Entwurfsdatenerfassungen, insbesondere von Geometriedaten, voraus. Individuelle und Nutzerrollenorientierte Nutzungsfälle für einen individuellen Gebäudeentwurf werden allenfalls im 2D-Grundriss oder BIM-Modell auf Basis von Erfahrungswerten des Architekten durchgespielt, werden aber nicht durchgängig formalisiert erfasst und können auch nicht computergestützt simuliert werden. Änderungen von Entwurfsentscheidungen können die Nutzbarkeit beeinflussen und führen ggf. zu Korrekturaufwänden, die umso höher sind, je später die Änderungen vorgenommen werden.

Die Berücksichtigung der Anforderungen an die Nutzung eines Gebäudes, einer Gebäudeeinheit oder abstrakter eines Raumzusammenhangs wird in dieser Arbeit als Gebäudenutzungsorientierung verstanden. Die Nutzungsorientierung im Gebäudeentwurf ist der Gegenstand der Untersuchung und Entwicklung der vorliegenden Arbeit. Von Interesse ist die Einordnung in die bisherigen Erkenntnisse der Architekturtheorie mit dem Schwerpunkt auf den konzeptuellen Entwurf. Aus diesen bisher gewonnen Sichtweisen einer Fokussierung der Modellierung von Gebäudenutzung und der Beziehung zwischen nutzendem Menschen und vom Gebäude angebotenen Funktionen werden weiterführende Modellbegriffe vorgeschlagen. Die Überlegungen, wie die Begriffe zur Nutzungsorientierung formal gefasst werden können, so dass auf dieser Basis eine Modellbildung erfolgen kann, die durch ein computergestütztes, modellbasiertes, methodisches Vorgehen relevante Verwendungen im Gebäudeentwurf ermöglicht, führen zur Idee, etablierte Methoden zu betrachten, die insbesondere die Modellierung eines weiten Spektrums der realen Welt, ihrer Dinge und Abläufe gestatten: Die Informatik bietet genau diese Grundlagen für die Modellierung und ein methodisches Vorgehen.

¹ Friedrich Schiller: Wallenstein. Wallensteins Tod II, 2.

² Der Entwurf mit Diagrammen für einen zweidimensional dargestellten, geometrischen Grundriss und für zweidimensionale Ansichten wird seit Jahrzehnten durch CAD-Systeme unterstützt. CAD ist die Abkürzung für Computer Aided Design.

³ Eine aktuelle Einführung und Übersicht in das Building Information Modeling (BIM) gibt [BIM 2015].

In einem interdisziplinären Diskurs, der die Problemstellung der Architektur, nämlich der Unterstützung des konzeptuellen nutzungsorientierten Gebäudeentwurfs, mit dem Lösungsfundus der Informatik hinsichtlich der Modellierungsmethodik verbindet, wird eine methodische Modellierungsbasis für die detailliert herausgearbeiteten Anforderungen der gegebenen Problemstellung selektiert und ein Metamodell für den nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurf entwickelt sowie ein Realisierungsansatz vorgeschlagen, der mit BIM kombinierbar ist. Die methodische Vorgehensweise für Verwendungen im Entwurf ist Bestandteil der Modellierungsmethode.

Zwei Verwendungen stehen im Vordergrund dieser Arbeit: zum einen die Unterstützung des Entwurfs von Individual- und Spezialbauten und zum anderen die Unterstützung der Bestandsprüfung und Diagnose eines gegebenen Gebäudes. In beiden Verwendungen bilden bestehende Anforderungen an die Nutzung den Ausgangspunkt für eine Lösung der gestellten Aufgabe. Anhand zweier beispielhafter Problemstellungen wird in 2.2 die Motivation für diese Arbeit anschaulich hergeleitet; in 6 werden die Beispiele wieder aufgegriffen und gezeigt, wie die vorgestellte Modellierungsmethode zur Bearbeitung dieser Problemstellungen verwendet wird.

2.2 Motivation der Problemstellung anhand von Beispielen

Die benannte Problemstellung und die verwendeten Begriffe werden in diesem Abschnitt veranschaulicht. Zwei Beispiele, die zugleich zwei Verwendungen der in dieser Arbeit entwickelten Modellierungsmethode zeigen, motivieren die Sichtweise eines nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs und zeigen auf, welche Problembereiche im konzeptuellen Entwurf ein methodisches Vorgehen auf Basis einer formalen Modellbildung verbessern kann. Die Beispiele werden auch zum Abschluss zur Veranschaulichung der Ergebnisse dieser Arbeit verwendet. Das erste Beispiel behandelt den Entwurf eines Einfamilienhauses unter Berücksichtigung späterer Umnutzung und das zweite Beispiel die Bestandsprüfung und Diagnose für eine Zahnarztpraxis.

Der Entwurf eines Einfamilienhauses beginnt mit der Aufnahme der Wünsche des Bauherren. Neben Lage, Grundstück und Ausrichtung werden Anforderungen an Gestalt, technische Ausstattung und das Raumprogramm gestellt. Das Raumprogramm beschreibt Anzahl, Art, Größe und Lage der Räume zueinander und insbesondere im Zusammenhang mit dem Bauplatz und der Ausrichtung des Gebäudes. Auch die soziale Struktur der Bewohner wird erfasst, um Lebensabläufe zu verstehen und den Grundriss entsprechend gestalten zu können. Dies betrifft Individualbauten, während die Freiheitsgrade in konfektionierten Häusern etwa einer Baugesellschaft deutlich geringer sind hinsichtlich des Raumprogramms und Grundrisses. Im Falle des Entwurfs eines individuell geplanten Einfamilienhauses stellt die Nutzbarkeit einen Wert des Gebäudes für den Bauherren bzw. zukünftigen Gebäudenutzer dar. Solche Anforderungen spiegeln Nutzungsabläufe, insbesondere aus dem Alltag, wider, wie sie beispielsweise in Tabelle 1 formuliert sind. Ist der Blick auf eine langfristige Nutzung gerichtet, ist auch über zukünftige Nutzungen nachzudenken.

Das weitere Vorgehen des Architekten umfasst die Aufnahme der Anforderungen, meist in textueller Form oder auch in ersten Skizzen zum Raumprogramm mit Anordnung und Größen der Räume. Aus den beispielhaften Anforderungen können Räume abgeleitet werden und aus den genannten Raumbezeichnungen kann auf Funktionen des Raums geschlossen werden. Die beschriebenen Bewegungen zwischen Räumen lassen auf Raumbeziehungen schließen. Raumbeziehungen werden im Entwurf durch Raumübergänge modelliert. Ein Raumübergang kann eine Tür, Treppe, Rampe, Fahrtreppe, Fahrsteig oder ein offener Durchgang etc. sein, also ein Element, welches Räume trennt, aber einen Übergang zwischen Räumen zulässt. In der Arbeit wird diese Ausprägung als Raumübergangstyp bezeichnet.⁴ In der Tabelle 1 sind diese Hinweise beispielhaft markiert: Räume

⁴ Eine Herleitung und Definition dieser Entitäten erfolgt in 3.3, für die Ausarbeitung der Modellierungsmethode in 4.2 und im Zusammenhang mit der Metamodellbildung in 5.1.

gelb, Funktionen rot und Beziehungen orange. Aus dem Text gehen auch Anforderungen an die Zugänglichkeit bzw. Barriereanforderungen hervor, die grün markiert sind. Die Anforderungen an Zugänglichkeit und Barriere stehen im Zusammenhang mit dem Raumübergangstyp. Eine Treppe ist beispielsweise nicht barrierefrei für Rollstuhlfahrer. Die Einordnung des Gebäudes in die Umgebung sowie die Gestaltung im Innen- und Außenbereich werden betrachtet. Begleitend wird aufgrund der Nutzungs- und Gestaltungsanforderungen gedanklich durchgespielt, wie die formulierte Nutzung erfolgen kann. Diese Überlegungen haben Einfluss auf die Konzeption des Raumprogramms. Ein Abgleich mit Gestaltungswünschen führt durch iteratives Vorgehen zu einem konzeptuellen Entwurf. Als Ergebnis dient der Vorentwurf den weiteren Schritten der Kostenermittlung, dem Entwurf, den Genehmigungen, der Realisierungsplanung und Ausführung etc.. Diese Schritte sind nicht im Fokus dieser Arbeit. Es interessiert der konzeptuelle Entwurf und der Übergang von den Nutzungsanforderungen zur Entstehung des konzeptuellen Entwurfs.

Nutzungsanforderungen für die Gegenwart	
1.	Die Einkäufe können über einen direkten Zugang aus der Garage ohne Stufen und Schwellen in einen Vorratsraum gebracht werden, der Nachbarraum der Küche ist.
2.	Für die Gartenarbeit sollen in einem Raum Geräte und Grünbehälter gelagert werden können. Der Zugang soll direkt vom Garten aus erfolgen. Es fällt auf, dass es praktisch wäre, wenn ein Waschplatz, besser eine Duschmöglichkeit und möglichst eine Toilette aus dem Garten erreichbar wäre, ohne mit schmutziger Kleidung durch mehrere Räume wie Wohnzimmer oder Empfangsbereiche laufen zu müssen.
3.	Für Besucher ist ein Gästezimmer gedacht, welches möglichst einen direkten Zugang zu einem Duschbad hat und am „öffentlichen“ Flur liegt, von dem das Wohnzimmer erreichbar ist.
4.	Der Elternbereich soll aus Schlafzimmer, Bad und Umkleidebereich bestehen. Ein Übergang vom Schlafzimmer zum Umkleidebereich und von dort zum Bad soll durch eine Tür führen. Der Elternbereich soll zu anderen Räumen oder Fluren durch Türen getrennt sein.
5.	Als Freund der Privatsphäre und eines grünen, aber pflegeleichten Aufenthaltsbereichs im Freien wünscht sich der Bauherr eine große Terrasse, die vom Wohnzimmer, Elternbereich, den zwei Kinderzimmern und auch vom Flur für Gäste zugänglich ist.
6.	Morgendlicher Ablauf, bestehend aus drei Nutzerrollen: „Mutter steht auf, nutzt Bad, bereitet Frühstück in Küche vor, weckt Kind, gemeinsames Frühstück im Esszimmer, gemeinsames Abräumen/zur Küche, nutzt Bad (Zähne putzen etc.)/Ankleiden, mit Mann und Kind durch direkten Zugang in Garage zum Auto. // Vater steht auf, nutzt Bad, gemeinsames Frühstück im Esszimmer, gemeinsames Abräumen/zur Küche, nutzt Bad (Zähne putzen etc.)/Ankleiden, bearbeitet im Heimarbeitszimmer erste E-Mails, dann mit Frau und Kind durch direkten Zugang in Garage zum Auto. // Kind steht auf, nutzt Bad, gemeinsames Frühstück im Esszimmer, nutzt Bad (Zähne putzen etc.), mit Eltern durch direkten Zugang in Garage zum Auto.“
Nutzungsanforderung für die Zukunft	
7.	Im Falle einer Pflegebedürftigkeit wünscht sich der Bauherr die Möglichkeit, daheim unterstützt zu werden, im Bedarfsfall auch durch eine Pflegekraft, die tageweise im Haus mit wohnt. Als Wohnbereich könnte das Gästezimmer dienen, wobei dann durch möglichst geringe Umbaumaßnahmen eine Erschließung über einen separaten Eingang erreicht werden soll.
8.	Der Bauherr hat ein Kind, welches aufgrund seiner Disposition möglicherweise auch als junger Erwachsener länger als andere im Elternhaus wohnen müsste. Dazu soll ein gewisser separierter Wohnbereich geschaffen werden, der aus Wohnzimmer, Schlafzimmer und eigenem Bad besteht. Der Zugang zu diesem Bereich kann über den gemeinsamen Eingang oder durch Schaffung eines Nebeneingangs erschlossen werden. Alle Umbaumaßnahmen sollen sich auf Durchbrüche oder Türinstallationen beschränken.

Tabelle 1: Beispiel für Nutzungsanforderungen für den Entwurf eines Individualbaus

Für den Übergang zur Entstehung des Entwurfs greift der Architekt explizit oder implizit auf seine Erfahrung zurück. „For most types of questions that may arise during a design process, the only way to avoid inefficient, random research is by employing the references that are associated with the architect, selected from all the materials that are “absorbed and registered” in the architect's mind, as Hertzberger states.“ [Stapenhorst 2016], S. 191. Die Ableitung eines Grundrisses kann unter Rückgriff auf bereits geplante Wohnhäuser geschehen, jedoch unterstellt dies, dass die damit erfüllten Nutzungsanforderungen auch für die nun beschriebene Nutzung gelten. Die Präzision der Umsetzung in ein Raumprogramm und Grundriss setzt eine genaue Erfassung der Nutzungsanforderungen voraus. Diese sind textuell sicher beschreibbar, aber wenig anschaulich, insbesondere weil Abläufe beschrieben werden, die komplexer sind als geforderte statische Eigenschaften des Gebäudes wie Raumgrößen, Flurbreiten etc.. Das gemeinsame Verständnis der Anforderungen zwischen Anforderer und Entwerfer ist eine weitere Voraussetzung für die Präzision. Die Überprüfung der Erfüllung der Nutzungsanforderungen, d. h. in der Regel von Nutzungsabläufen, erfordert eine hohe Vorstellungskraft beim Architekten und beim Bauherrn, um zu einem gemeinsamen Verständnis über die Erfüllung der Anforderungen durch den Grundriss bzw. das Gebäudemodell zu kommen. Anforderungen an eine spätere Veränderung des Gebäudes durch Umnutzung können durch generelle bauliche Lösungen angegangen werden, z. B. herausnehmbare oder Schiebewände. Der Umfang ist je nach Gebäudetyp unpräzise planbar. In einem Bürogebäude mag dies für den variablen Raumzuschnitt für sich wandelnde Organisationsabläufe passend sein. Für die Gestaltung eines Einfamilienhauses wird eine präzisere Planung fester Wandelemente erwartet.

Resultierend können Missverständnisse entstehen. Abweichungen müssen später hingenommen oder aufwändig korrigiert werden. Für den Typus eines individuell geplanten Einfamilienhauses mag die Abbildung von Nutzungsanforderungen auf ein Raumprogramm und einen Grundriss ohne einen neuen methodischen Ansatz ausreichend präzise erfolgen können. Es ist aber im Sinne des erzielbaren Wertes ein bezüglich der vorgesehenen Nutzungsabläufe präzises Raumprogramm erforderlich. Für Spezialbauten für komplexere Nutzungen werden in Anzahl und Komplexität steigende Spezifikationen der Nutzungsabläufe geplant. Die Nutzer verfügen über diverse Rollen und Nutzungsverhalten nach festen Prozessen oder individuellen Verhaltensweisen. Beispiele sind im Fall strukturierter Nutzungsabläufe eine Arztpraxis oder ein Parkhaus; im Fall höherer Komplexität durch Vielfalt der Abläufe ein Krankenhaus; oder im Fall höherer Komplexität durch Vielfalt und Zufälligkeit des Nutzungsverhaltens ein Einkaufszentrum.

Der Prozess des Übergangs von den Nutzungsanforderungen zum konzeptuellen Entwurf sollte durch ein methodisches Vorgehen unterstützt werden, welches dem Architekten, der diesen Prozess gestaltet, Hilfsmittel bereitstellt. Die Unterstützung sollte einerseits die Entwicklung des Raumprogramms und Grundrisses bzw. einer Abstraktion dessen aus der Anforderungsspezifikation der Nutzung fokussieren, und andererseits die Kommunikation der Beteiligten, insbesondere Architekt und Bauherr, über die Erfüllung der Nutzungsanforderungen durch das konzeptuell entworfene Gebäude erleichtern und präzisieren. Im Entwurf von IT-Systemen⁵ hat es sich bewährt, die Anforderungsdefinition durch formale Mittel zu unterstützen, die einen Übergang von formulierten Anforderungen an die Nutzung hin zum Entwurf des Systems unterstützen, welches diese Anforderungen erfüllen soll. Diesen Ansatz zu übertragen auf die Gebäudenutzung, wäre ein Vorschlag, dessen Prüfung lohnenswert erscheint. Hierbei muss ein Begriff für die Abstraktion von Raumprogramm oder Grundriss gefunden werden, der geeignet ist, die Unterstützung von Nutzungsanforderungen durch ein konzeptuell entworfenes Gebäude, also die Gebäudenutzung, zu erfassen bzw. zu modellieren, zu verstehen und zu bewerten. Als abstrahierter Begriff wird in dieser Arbeit der Begriff der Gebäudetopologie als Zusammenhang aus Räumen und Funktionsangeboten eingeführt. Ein methodisches Vorgehen wäre wünschenswert, welches erlaubt, die Nutzungsanforderungen formal zu

5 IT ist die Abkürzung für Information Technology, im Deutschen Informationstechnologie.

beschreiben und die Gebäudetopologie herzuleiten. Das Raumprogramm wird berücksichtigt, um hergeleitete Topologie-Abschnitte auf Vollständigkeit der Räume zu prüfen und die Abschnitte zusammenzusetzen, sofern Freiheitsgrade gegeben sind, die durch keine Nutzungsanforderung beschränkt werden. Es gilt aber im Wesentlichen herauszufinden,

- welche Mittel hilfreich sind, um die Nutzungsanforderungen zu beschreiben und eine Prüfung an einem Modell der Gebäudetopologie zu ermöglichen,
- welches Modell einer solchen Modellbildung zugrunde liegen kann, also welches Metamodell Grundlage sein kann,
- welche der etablierten Methoden des Architekturentwurfs hierdurch unterstützt würden und
- wie das Vorgehen auf Basis von Modell und Methoden für die Verwendung im Entwurf von Individual- und Spezialbauten gestaltet wird.

Das zweite Beispiel zeigt die Unterstützung des Findens eines geeigneten Bestands und der Eignungsprüfung durch Diagnose eines Gebäudes, einer Gebäudeeinheit oder abstrakter eines Raumzusammenhangs für eine definierte Nutzung. Die Nutzung umfasst die Bewegung in dem Raumzusammenhang und die Anwendung von gewünschten Funktionen. Die Nutzungsanforderungen beschreiben kooperative funktionale Abläufe. In dem Beispiel wird auch Barrierefreiheit gefordert, da Räumlichkeiten für den Betrieb einer Zahnarztpraxis gesucht werden. Die Anforderungen an die Nutzung sind durch Nutzungsabläufe beschrieben; Beispiele sind in Tabelle 2 genannt.

Die Anforderungen beschreiben Räume mit Bezeichnungen, aus denen auf Funktionen des jeweiligen Raums geschlossen werden kann. Die beschriebenen Bewegungen zwischen Räumen lassen auf geforderte Raumbeziehungen schließen. In Tabelle 2 sind diese Hinweise beispielhaft markiert: Räume gelb, Funktionen rot und Beziehungen orange. Aus dem Text gehen auch Anforderungen an die Zugänglichkeit bzw. Barriereanforderungen hervor, die grün markiert sind. Die Formulierungen müssen genau analysiert werden, um

- abgeschlossene Räume und Raumübergänge abzuleiten aus Verben wie „betritt“ (Nr. 1, 2, 3), Adverbien wie „in“ (Nr. 1, 2) oder „im“ (Nr. 2);
- aus genannten Tätigkeiten wie in Nr. 3 auf Funktionsräume zu schließen, ohne ihre explizite Benennung;
- aus Räumen für bestimmte Nutzerrollen eine Zugangsberechtigung und Türelemente abzuleiten, wie im Falle eines Personalraums oder Labors;
- die Unterscheidung zwischen einer Funktionsnutzung durch eine einzelne Person oder durch eine Gruppe von Personen unterschiedlicher Rollen zu erkennen: ein Patient wartet durchaus alleine im Warteraum, ein Arzt behandelt einen Patienten zusammen mit einer zahnmedizinischen Fachangestellten im Behandlungsraum oder Labor.

Andere Formulierungen sind leicht erkennbar, wie die geforderte Barrierefreiheit in Nr. 3 bis 5, bedeuten dann aber, dass diese Anforderung für alle Raumübergänge gilt.

Aus den Barriereanforderungen können Anforderungen an den Raumübergang und seinen Übergangstyp abgeleitet werden, z. B. eine Tür unterschiedlicher Breite, Treppe, etc.. Die Raumgröße wird bestimmt durch die Funktion und zu erwartende Kapazität, wie im Falle des Wartezimmers oder der Behandlungsräume. Die Barriereanforderung ist auch hier relevant, wobei Erfahrungswerte und Vorschriften in den Entwurf eingehen, wie in [Neufert 2016] aufbereitet.

Nutzungsanforderungen	
1.	Ein Arzt <u>betritt</u> die <u>Zahnarztpraxis</u> und nutzt zunächst den <u>Personalraum zum Umkleiden</u> . Umgekleidet <u>behandelt er Patienten zusammen mit zahnmedizinischen Fachangestellten</u> , <u>wechselt Behandlungsräume</u> , <u>nutzt das Labor</u> und <u>geht hin und wieder zur Pause in den Personalraum</u> .
2.	Ein zahnmedizinischer Fachangestellter <u>betritt</u> die <u>Zahnarztpraxis</u> und nutzt zunächst den <u>Personalraum zum Umkleiden</u> . Umgekleidet <u>assistiert er dann bei Behandlungen</u> , <u>wechselt Behandlungsräume</u> , <u>arbeitet im Labor</u> und <u>geht hin und wieder zur Pause in den Personalraum</u> .
3.	Ein Patient <u>betritt</u> die <u>Zahnarztpraxis</u> , <u>meldet sich an</u> , <u>wartet</u> , <u>wird behandelt</u> , <u>vereinbart eventuell einen Folgetermin</u> und <u>verlässt</u> die Praxis. Er kann sich hierbei <u>barrierefrei</u> bewegen.
4.	Eine <u>WC-Nutzung</u> soll möglich sein. Hierbei reicht die <u>Barriereanforderung</u> bis hin zur Barrierefreiheit.
5.	Ein <u>Labor für Röntgen oder Zahnersatz-Behandlung an einem Patienten durch einen Arzt und einen zahnmedizinischen Fachangestellten</u> kann <u>barrierefrei erreicht</u> und genutzt werden.

Tabelle 2: Beispiel für Nutzungsanforderungen für die Bestandsprüfung und Diagnose

Aus den Nutzungsanforderungen geht hervor, dass nicht nur statische Eigenschaften von Räumen oder Raumbeziehungen spezifiziert werden, sondern es werden Nutzungsabläufe aus Bewegungen im Gebäude und Anwendung von Funktionen in den Räumen gefordert. Die Nutzung von Funktionen durch mehrere Teilnehmer verschiedener Rollen ist das Gebäudenutzungsszenario mit der höchsten Komplexität in diesem Beispiel. Es erfordert das Zusammenkommen von Teilnehmern vordefinierter Rollen, hier Patient, Arzt und Assistent, in einem Raum, der den Zugang allen Beteiligten erlaubt und eine Funktion anbietet, die gemeinsam genutzt werden soll, im Beispiel die Behandlung. Die Nutzer unterschiedlicher Rollen können unterschiedliche Nutzungsbedürfnisse haben, die im Beispiel durch die Nutzungsanforderungen Nr. 1 bis 3 als sogenannte Nutzungsfälle für die drei Nutzerrollen spezifiziert sind. Die Gebäudeeinheit, abstrakt der Raumzusammenhang, muss diese Anforderungen erfüllen, damit eine Zahnarztpraxis betrieben werden kann. Für eine Überprüfung kann ein vorliegender Grundriss untersucht werden, wie etwa derjenige in Abbildung 1. Dieser Grundriss wird als Bildzitat verwendet, da der Autor dieser Arbeit im Folgenden die Vorstellung seiner Modellierungsmethode und seines Realisierungsansatzes anhand eines Grundrisses erläutern möchte, der mit [Neufert 2016] einer Quelle entstammt, die als Referenzwerk der Bauentwurfslehre geltend anerkannte Grundrissreferenzen enthält, die keinen Anlass geben, in ihrer Güte sowie ihrer Stellung als neutrale Referenz angezweifelt zu werden.

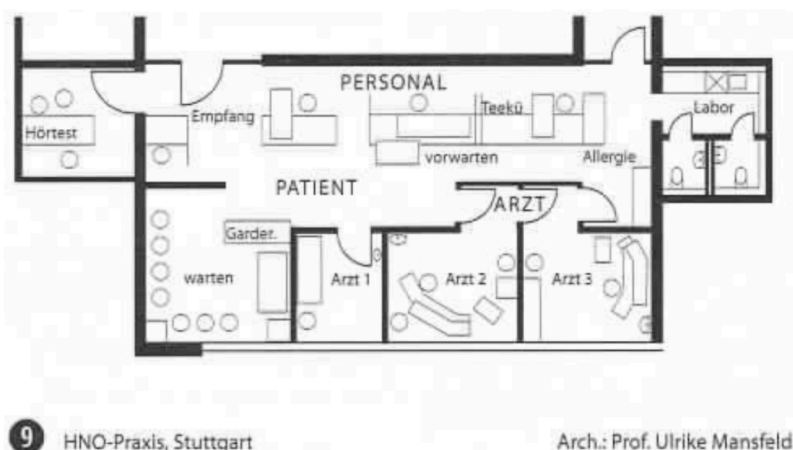


Abbildung 1: Verwendung in der Diagnose — Grundriss für Bestandsprüfung, Beispiel
Quelle: [Neufert 2016], S. 546

Der Abgleich der Nutzungsanforderungen mit dem gegebenen Gebäudevorschlag findet gegenwärtig

tig anhand von Grundrissen, Visualisierungen in BIM-Modellen der Räumlichkeiten sowie durch Besichtigungen statt. Auch Analysen und Simulationen für Fluchtwegplanungen werden betrachtet.⁶ Die Eignungsprüfung für die konkreten Nutzungsabläufe erfordert Vorstellungskraft der Beteiligten. Dies ist eine nicht dokumentierte, gedanklich sehr anspruchsvolle und fehleranfällige Vorgehensweise und ist erstens formal ungenau und zweitens aufwändig. Die Ungenauigkeit entsteht insbesondere durch die nicht formal und eindeutig beschriebenen Nutzungsanforderungen. Für fachlich spezifische Abläufe ist Genauigkeit allerdings wichtig. Auch Anforderungen an relevante Zustände wie Barriereanforderungen oder Zugangsberechtigungen sind möglichst eindeutig zu formulieren. So ist beispielsweise das Erkennen von Hinderungen in der gegebenen Gebäudeeinheit relevant. Selbst wenn die Nutzung im Falle einer einfachen Nutzungsanforderung offensichtlich einschätzbar ist, so ist für komplexe Nutzungsabläufe mit mehreren Beteiligten die Frage nachvollziehbar zu beantworten, welche Bereiche eines gegebenen Gebäudes einen gegebenen Nutzungsfall verhindern.

Aufgrund der erkannten Defizite sind drei Aspekte für die Unterstützung der Bestandsprüfung bzw. Diagnose zu verbessern: die Spezifikation der Nutzungsanforderungen, die geeignete Modellierung des Gebäudes, so dass drittens eine methodisch fundierte, modellbasierte Prüfung stattfinden kann. Die Unterstützung der klaren Spezifikation von Nutzungsanforderungen sollte wie im ersten Beispiel durch eine Modellierungsmethode erfolgen, die etabliert ist im Bereich der Anforderungsspezifikation. Die genannten Nutzungsanforderungen beschreiben Räume und ihre Zusammenhänge bzw. Raumübergänge und stellen keine Anforderungen auf der Ebene geometrischer Details. Daher ist, wie im ersten Beispiel, die Gebäudetopologie ein passendes Abstraktionsniveau für die Eignungsprüfung der Nutzungsanforderungen für ein mögliches Gebäude bzw. einen Raumzusammenhang. Eine Abbildung dessen auf die Gebäudetopologie aus Räumen, Übergängen und Funktionsangeboten sowie weiteren Eigenschaften wie Zugangsberechtigungen und Barriereangaben erscheint ein passendes Modell für diese Überprüfung zu sein. Auch die Nutzungsanforderungen sind in einer formalen Modellierungssprache zu formulieren, so dass sie in eine formale Prüfung der Gebäudetopologie eingehen können. Die Eignungsprüfung soll formal und anschaulich sein und zeigen, ob ein gegebener Nutzungsfall durch ein gegebenes Gebäude unterstützt wird. Hierbei reicht eine Visualisierung der statischen Sicht, also der Grundriss oder ein statisches BIM-Modell des realen Gebäudes, nicht aus, sondern es muss zusätzlich die Dynamik der Nutzungsabläufe gezeigt werden können. Dabei sind die Nutzungsabläufe komplex, denn sie bestehen nicht nur aus Bewegung im Gebäude, sondern auch in der Nutzung von Funktionen, die in dem Gebäude an diversen Orten angeboten werden. Die Nutzung kann durch Einzelpersonen oder mehrere Personen zusammen geschehen, wie z. B. die Behandlung beim Zahnarzt. Die Prüfung soll zum Verständnis der Eignung, aber auch von Umnutzungsmöglichkeiten und den Effekten auf die geforderte Nutzbarkeit beitragen.

Im Wesentlichen ist es Aufgabe, für die Unterstützung des Findens eines geeigneten Bestands und der Eignungsprüfung durch Diagnose eines Gebäudes, einer Gebäudeeinheit oder abstrakter eines Raumzusammenhangs für eine definierte Nutzung herauszufinden,

- welche Mittel hilfreich sind, um die Nutzungsanforderungen und die Gebäudetopologie formal so zu beschreiben, dass eine Prüfung der Nutzungsanforderungen an einem Modell der Gebäudetopologie anschaulich möglich wird,
- welches Modell einer solchen Modellbildung zugrunde liegen kann, also welches Metamodell Grundlage sein kann,
- welche der etablierten Methoden des Architekturentwurfs hierdurch unterstützt würden und
- wie ein Vorgehen auf Basis von Modell und Methoden für die Verwendung in der Bestandsprüfung und Diagnose eines Gebäudes für die gewünschte Nutzung ausgeprägt ist.

⁶ In 3.4 wird hierauf näher eingegangen.

2.3 Ziele für die Modellierungsmethode und den Realisierungsansatz

Den konzeptuellen Gebäudeentwurf zu unterstützen, ist Gegenstand aktueller Forschung. Die Fragestellung hierbei ist, wie diese Phase den modellgestützten Arbeiten nützen und umgekehrt davon profitieren kann [BIM 2015], S. 565 u.. Für den Entwurfsprozess wird in der BIM-Forschung eine hohe Relevanz der Einbeziehung von Analysen und Simulationen in frühen Phasen gesehen, um Entwurfsentscheidungen objektiv und logisch herzuleiten und durch Dokumentation in späteren Phasen nachvollziehbar zu machen.⁷ Es existieren nach heutigem Stand der Forschung aber gerade in den frühen Entwurfsphasen „nur wenige entwurfsunterstützende, intuitiv zu bedienende Softwarewerkzeuge ... , um Kreativität zu fördern sowie die vagen und unvollständigen Informationen zu behandeln.“⁸

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Modellierungsmethode für den nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurf und das Aufzeigen eines Realisierungsansatzes unter Berücksichtigung gesetzter Standards wie BIM. Die Modellierungsmethode soll den Architekten in der Phase des konzeptuellen Gebäudeentwurfs darin unterstützen, die Anforderungen des Nutzers formal zu spezifizieren, in den Entwurf einzubeziehen und die Erfüllung dieser durch ein konzeptuelles Gebäudemodell mit geeigneten Mitteln zu überprüfen. Der Realisierungsansatz soll auf der Grundlage dieser Modellierungsmethode den Rahmen für Metamodelle für diese Modellierungsgegenstände geben. Der vorgestellte Ansatz soll mit Ansätzen der Architekturinformatik, etwa BIM auf Basis der Industry Foundation Classes (IFC), verbunden werden können. Diese Integrierbarkeit ist wichtig, um das Ziel der BIM-Forschung zu fördern, den gesamten Lebenszyklus durch ein integriertes BIM-Modell zu unterstützen, wie in [BIM 2015], S. 4 gefordert.

Der hier vorgestellte Ansatz ist im Wesentlichen durch zwei Verwendungen motiviert: die Unterstützung des Entwurfs von Individual- und Spezialbauten und die Unterstützung der Bestandsprüfung durch Diagnose. In beiden Verwendungen sind die Nutzungsanforderungen und ein konzeptuelles Gebäudemodell Modellierungsgegenstände. Die Modellierungsmethode und der Realisierungsansatz sollen einen Lösungsvorschlag bilden, der den Architekten in diesen Verwendungen unterstützen kann. Folgende inhaltliche Ziele werden angestrebt:

- Ziel 1) Die gewünschte Nutzung eines Gebäudes soll als Anforderung aufgefasst werden, die in Nutzungsfällen formalisiert beschrieben werden kann. Die Methode soll für die entsprechende Modellierung einen Rahmen geben. Ein Metamodell und darauf aufbauende Methoden und Vorgehensweisen sollen die Modellbildung der Nutzungsanforderungen mit dem Ziel der Verwendung unterstützen.
- Ziel 2) Das Gebäudemodell soll ein Abstraktionsniveau besitzen, das die Unterstützung der Verwendungen erlaubt. Aus den motivierenden Beispielen geht hervor, dass die Gebäudetopologie ein geeignetes Niveau sein kann. Dies soll in der Arbeit eruiert werden. Eine geeignete Metamodellbildung ist zu finden, die diesen Modellierungsgegenstand repräsentieren kann. Auf der Basis des Gebäudemodells sollen Methoden und Vorgehensweisen den Architekten bei der Modellbildung für die Verwendungen unterstützen.
- Ziel 3) Für die genannten Verwendungen soll ein modellbasiertes, methodisches Vorgehen geeignet sein, den Dialog der am Entwurf Beteiligten über die Erfüllung der Nutzungsanforderungen durch das Gebäude, genauer durch seine Topologie, anhand der Nutzungsfälle zu unterstützen. Insbesondere soll das Vorgehen also die Verwendungen des Entwurfs und der Bestandsprüfung unterstützen.

⁷ [BIM 2015], S. 266

⁸ ebenso

Ziel 4) Es sind etablierte Grundlagen der Modellbildung, Methoden des Architekturentwurfs und Vorgehensweisen für die Verwendungen zu betrachten. Hiermit soll bereits bewährtes Wissen wiederverwendet werden. Andererseits soll die Arbeit in den wissenschaftlichen Diskurs eingeordnet und die fachliche Innovation des Ansatzes abgegrenzt werden. In der Arbeit sollen Methoden des Architekturentwurfs, wie Modellbildung und Simulation, betrachtet und in das Vorgehen einbezogen werden. Bei dem Entwurf der Modellierungsmethode sollen grundsätzliche Anforderungen berücksichtigt werden: Vertrautheit und hohe Verständlichkeit der Modellierungssprache, Angemessenheit, Integrierbarkeit und Orientierung an der graphisch geprägten Arbeitsweise des Architekten.⁹

Ziel 5) Der Realisierungsansatz soll bewährte Vorgehensweisen ergänzen und mit etablierten Modellen wie BIM integrierbar sein. Aufgezeigt werden sollen dazu die zu ergänzenden und ggf. abzuändernden Vorgehensweisen im konzeptuellen Gebäudeentwurf. Bezüglich der BIM-Integration soll erarbeitet werden, welche Modell-Elemente eines BIM auf Basis der IFC mit dem hier vorgestellten Ansatz für eine zukünftige integrierte Software-Lösung verbunden werden können.

Bezogen auf den Entwurfsprozess begleiten folgende Fragestellungen die Ausarbeitung der Modellierungsmethode und des Realisierungsansatzes:

1. Welche Modellierungsbasis unterstützt eine einerseits hinreichend abstrakte und damit umfassende Beschreibung der Gebäudenutzung, und verfügt andererseits über semantisch eindeutige Sprachmittel, so dass Nutzungsabläufe präzise spezifiziert werden können?
2. Welche Methoden des Architekturentwurfs und welche Vorgehensweisen sind für die Verwendungen des Ansatzes eine geeignete Grundlage?
3. Welches Werkzeug kann das modellbasierte, methodische Vorgehen und insbesondere den Dialog über die Erfüllung von Nutzungsanforderungen durch die Gebäudetopologie und die Ableitung von Entwurfsentscheidungen unterstützen? Eine graphische Repräsentation ist hierbei anzustreben, die eine Anknüpfung an die graphische Repräsentation des BIM-Modells, zumindest aber an einen 2D-Grundriss des betrachteten Gebäudes, erlaubt.

Die Modellierungsmethode sei aber auch klar abgegrenzt von bestehenden Vorgehensweisen, Methoden und Standards. Denn die Intention der Arbeit liegt nicht in der Bearbeitung einer Variante von Bewährtem oder Bestehendem, sondern erhebt den Anspruch, eine Sichtweise auf den Entwurfsprozess durch einen neuen methodischen Ansatz zu eröffnen.

Damit liegt der Fokus dieser Arbeit erstens nicht auf Methoden des räumlichen und gestalterischen Entwurfs. Es werden keine Methoden oder Techniken zum Entwurf eines Gebäudes in Raum und Gestalt verfeinert oder neu vorgestellt. Der Fokus liegt zweitens nicht auf der Diskussion, Anzweiflung von oder dem Gegenentwurf zu BIM oder den IFC. Und drittens grenzt sich die hier vorgestellte Methode ab von auf den ersten Blick nahestehenden Verfahren des Model Checking auf Basis räumlicher Modelle oder eines BIM-Modells.

Zu allen drei Bereichen gibt es jedoch Anknüpfungspunkte, die die hier vorgestellte Modellierungsmethode und den mit ihr verbundenen Realisierungsansatz aus einem isolierten theoretischen Spielfeld führen und in eine Beziehung zu diesen relevanten Bereichen setzen. Die methodische Basis wird begründet auf etablierten Methoden des Architekturentwurfs. Der Realisierungsansatz wird in Beziehung zu BIM und zur IFC gesetzt. Und in den Anwendungsbeispielen werden Bezüge zu Model Checking Anwendungen am Beispiel der Zugangssimulation und Barriereüberprüfung deutlich.

⁹ In [Moelle 2006] wird ein umfassender Überblick zu rechnergestützten Planungsprozessen der Entwurfsphasen und eine Herleitung derartiger Anforderungen gegeben.

2.4 Zusammenfassung der Arbeit und Kapitelabfolge

Anschließend an diese Einführung werden in 3 zunächst die Begriffe des konzeptuellen Gebäudeentwurfs und der Nutzungsorientierung auf der Basis einer historischen Einordnung in 3.1 bzw. in 3.2 definiert. Die Nutzung eines Gebäudes beschreibt das Nutzungsangebot in Form von Bewegungs- und Funktionsnutzungsangeboten eines Gebäudes. Die Funktionsnutzung kann in unterschiedlichen Nutzungsszenarien erfolgen. Das Gebäude wird reduziert auf die für die Beschreibung der Nutzung relevante Topologie aus Räumen und Raumübergängen mit Verankerung von Funktionsangeboten an der abstrahierten Entität Raum. Der topologische Zusammenhang zwischen Räumen und Raumübergängen ist Grundlage des Bewegungsangebotes des Gebäudes. Auf den Zusammenhang zwischen dieser konzeptuellen Sicht und Begriffen aus der Bauentwurfslehre geht 3.3 genauer ein. Die Anforderung der Nutzung wird durch Nutzungsfälle spezifiziert. Die Gebäudenutzung beschreibt die Verbindung von Bewegungsanforderung und -angebot sowie Funktionsnutzungsanforderung und Funktionsangebot. Der Status quo bisheriger Arbeiten zum konzeptuellen Gebäudeentwurf wird in 3.4 zusammengefasst.

In 4 wird die Modellierungsmethode hergeleitet. Als Grundlagen werden einerseits in 4.1 anerkannte Basismethoden des Architekturentwurfs betrachtet. Andererseits wird die Modellierungsbasis hergeleitet. Dazu werden zunächst die Modellierungsgegenstände in 4.2 definiert. Hieraus abgeleitete Anforderungen und die Basismethoden des Architekturentwurfs dienen als Auswahlkriterium für die Bestimmung der Modellierungsbasis. Ausgangspunkt hierbei ist die Suche nach einer existierenden Basis, die verbreitet und bewährt ist und die die Auswahlkriterien erfüllt. In 4.3 werden Petrinetze ausgewählt, und in 4.4 wird genauer hergeleitet, dass Referenznetze passend sind, um die Anforderungen zu erfüllen. Beispielhafte Bezüge zur Modellierung mit Petrinetzen in Architektur und Bauwirtschaft zeigen die Aktualität von Petrinetzen als Modellierungsmethode. Die Neuartigkeit dieses Ansatzes wird schließlich in 4.5 durch Bezug auf den in 3.4 dargestellten Status quo der Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs abgegrenzt.

Die Modellierung wird in 5 auf dieser Modellierungsbasis gestaltet. Hierzu wird in 5.1 ein Metamodell für die Modellierungsgegenstände des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs entwickelt. Dies geschieht auf Basis der Referenznetze. Wie in 5.2 dargestellt, ist ein Realisierungsansatz gefunden worden, der auch eine Anbindungsmöglichkeit an BIM-Modelle auf Basis IFC bietet. Die Unterstützung des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs wird durch die aufeinander aufbauenden Konzepte Modell, Methode, Vorgehen und Verwendung in 5.3 ausgearbeitet. Das Metamodell ist Basis für die Modellierung eines Gebäudes bzw. seiner Topologie, seiner Nutzung, von Nutzungsfällen und der Gebäudenutzung wie in 5.3.1 dargestellt. Die methodische Vorgehensweise auf der Grundlage von Basismethoden des Architekturentwurfs wird in 5.3.2 und 5.3.3 beschrieben. In 5.3.4 werden Verwendungen aufgezeigt.

In 6 wird die Verwendung anhand von zwei ausführlichen Beispielen veranschaulicht. Im ersten Beispiel in 6.1 wird die Verwendung im Entwurf am Beispiel eines Einfamilienhauses und im zweiten Beispiel in 6.2 die Verwendung zur Diagnose am Beispiel einer Zahnarztpraxis dargestellt. In den Beispielen werden die Ergebnisse reflektiert und aus den Erfahrungen der Verwendung werden Vorschläge für weitere Arbeiten abgeleitet. Schließlich werden in 6.3 anhand von Beispielen weitere Verwendungsmöglichkeiten skizziert, die das Potenzial des vorgestellten Ansatzes beschreiben.

In 7 folgen eine Zusammenfassung und ein Ausblick. In 7.1 werden anhand der in 2.3 definierten Ziele die Ergebnisse zusammengefasst. Aus den bisherigen Erkenntnissen der Verwendung und den inhärenten Eigenschaften der Modellierungsbasis werden in 7.2 Ansätze für weitere aufbauende Arbeiten abgeleitet. Die Beiträge zur Theorie und Praxis werden in 7.3 beschrieben.

Ein Abkürzungsverzeichnis findet sich in 8, und die zitierten Quellen sind in 9 aufgelistet.

3 Konzeptueller Gebäudeentwurf und Nutzungsorientierung

„It was through this metaphor that one could visualize and talk about the “function of a building.”“¹⁰

Das Zitat steht im Zusammenhang mit den Ausführungen von H. Pai zur Verwendung von funktionalen Diagrammen beim Entwurf von Gebäuden. Die genannte Metapher eines Gebäudes als mechanischer Apparat oder als der Natur ähnliches System und Bestandteil der Lebensprozesse ist verbunden mit dem Zeitgeist der westlichen Architekturtheorie in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts, einerseits den Menschen aufgrund von Analysen der Bewegung im Gebäude als „functionalized body“ aufzufassen, und andererseits auf die Funktionsunterstützung optimierte Gebäude als „functionalized space“ zu sehen. Der hier vorgestellte Ansatz verbindet die Begriffe Nutzungsanforderung eines abstrakten Nutzers und Nutzungsangebot eines Gebäudes in einem visualisierbaren Modell der Gebäudenutzung.

Der intellektuelle Weg hin zu diesem Modell beginnt mit der Klärung der Begriffe des *konzeptuellen Gebäudeentwurfs* als methodisches Mittel des Vorgehens in 3.1 und der *Nutzungsorientierung* in 3.2 als Sammelbegriff für die Modellierungsgegenstände, die den nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurf beschreiben. Der enthaltene Begriff Gebäude wird bewusst separat in 3.3 behandelt, nachdem zunächst festgelegt ist, was in dieser Arbeit unter konzeptuellem Entwurf und Nutzungsorientierung verstanden wird. Die folgenden Ausführungen beziehen sich selbstverständlich auf den Entwurf von Gebäuden. Der Status quo der bisherigen Arbeiten zum konzeptuellen Gebäudeentwurf wird in 3.4 zusammengefasst.

3.1 Konzeptueller Gebäudeentwurf

Die Leitfrage „Was wird in dieser Arbeit unter konzeptuellem Gebäudeentwurf verstanden?“ wird zum einen auf die Beantwortung folgender Fragen zurückgeführt, um die Komplexität der Frage durch den konkreten begrifflichen Bezug zu reduzieren:

1. Worauf fokussiert die Modellierungsmethode den Entwurf?
2. Was bedeutet Konzept im Zusammenhang mit dem Entwurf in dieser Arbeit?

Zum anderen wird eine Einordnung in die westliche architektonische Entwurfstheorie des zwanzigsten Jahrhunderts skizziert, um zu zeigen, dass bisherige Gedankenkonstrukte ähnliche Modellierungsziele verfolgten und verwendete Mittel hinsichtlich ihrer Anwendungsfolgen im Entwurf differenziert zu bewerten sind. Pai gibt in [Pai 2002] eine ausführliche Darstellung der mit dem architektonischen Entwurf verbundenen Repräsentationen, ihren Entstehungsmotiven und Auswirkungen auf die bauliche Realität. Auf diese stützen sich die folgenden Ausführungen, auf deren Basis die eingangs formulierten Fragen zur Begriffsbestimmung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs am Ende dieses Abschnitts 3.1 beantwortet werden.

Der Bedarf nach größeren Gebäuden in US amerikanischen Städten um 1900 stellte eine hohe Anforderung an den architektonischen Entwurf und die Realisierung der Gebäude dar. Insbesondere sollten Gebäudeprogramme realisiert werden, die die Notwendigkeit erfüllten, dass das zu schaffen-

¹⁰ [Pai 2002], S. 197. Die Metapher wird im Folgenden aus ihrem historischen Kontext kommend in den Zusammenhang mit der Nutzungsorientierung gestellt und dadurch gezeigt, dass die Sichtweise des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs eine Verankerung in der bisherigen Entwurfstheorie hat und ihr einen neuen formalen Ansatz hinzufügt.

de Gebäude hocheffizient bezüglich des geforderten Zwecks funktioniert. So entstand „The metaphor of the building as machine“ [Pai 2002], S. 85, die die durch das Gebäude zu unterstützenden Abläufe, beispielsweise in Fabriken, in den Vordergrund rückten. In dem Zusammenhang wurde dem Architekten eine weniger große Bedeutung bei der Realisierung zugemessen als dem Ingenieur, der die Fabrik aus Sicht der Prozesse und Bewirtschaftung plant.

Die Schaffung geschäftsgetriebener und effizienter Gebäude erforderte im Entwurf Repräsentationsformen, welche die diese Effizienz realisierenden Gebäudefunktionen ausdrücken konnten. Pai erläutert Taylor's *Functional Plan* am Beispiel des Baus effizient funktionierender Hotels in einem Entwurfsprozess aus mehreren Schritten [Pai 2002], S. 87–91. Im ersten Schritt erfolgt das Studium der Bedürfnisse und Möglichkeiten entlang der Geschäftsbereiche; im zweiten Schritt entsteht ein Plan der sogenannten *Space Functions* inklusive der Zuordnung von geschätzten Raumgrößen und -anzahl. Dies ist der Ausgangspunkt für die Planung durch den Architekten, wobei der Prozess unter Einbeziehung der physischen Gegebenheiten und Bedingungen zu Anpassungen des Ausgangspunkts führt, also eine wechselseitige Planung entsteht. Es entsteht ein neuer Fokus gegenüber dem Beginn des Entwurfs. Die Einheiten der Gestaltung sind nicht architektonische Elemente, sondern Einheiten von *Space Functions*. Der Raum wird von einer funktionalen Sichtweise aus zugeteilt und gebildet, so dass die entstehenden Einheiten vom Architekten in geeignete Beziehungen zu setzen sind. Dementsprechend ist der architektonische Plan ein logisches Produkt eines linearen Prozesses vom funktionalen zum physischen Plan mit den Schritten Untersuchung, Planung, Entwurf und architektonische Zeichnungen. Es wurde aber darauf hingewiesen, dass kein Widerspruch zum oder gar die Aufgabe der Kunst im Entwurf entstehen sollte. Aber die Reduktion der Rolle des Architekten auf die Übersetzung der Anforderungen, die von Domänenexperten erfasst werden, hin zu einem schematischen Entwurf, der durch den Bauzeichner weiterbearbeitet wird, wird als neue Gegebenheit genannt.

Es erfolgte eine zunehmende Spezialisierung auf Anwendungsgebiete der Gebäude, wie Fabriken oder verarbeitendes Gewerbe unterschiedlicher Branchen, wegen der zunehmenden Komplexität der spezifischen funktionalen Planung. Dies führte zur Einrichtung von Institutionen wie dem Technical News and Research Department. Technical News hatte das Ziel, vom einzelnen Projekt abstrahierte Standards für den Entwurf und die Konstruktion zu entwickeln. In dem linearen Prozess der oben genannten funktionalen Planung sollten diese nicht nur der nächste Schritt zur Umsetzung der Anforderungsdefinition in einen Entwurf sein. Die Einführung des *Functional Diagram* Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts war der nächste Entwicklungsschritt mit dem Ziel der Berücksichtigung funktionaler Anforderungen, die an ein Gebäude gestellt werden. Das *Gilbreth Diagram* repräsentierte funktionale anstelle räumlicher Einheiten. Es handelte sich um statische Modelle, die keine Bewegung von menschlichen Körpern oder Materialflüsse repräsentierten, wie sie z. B. in Fabriken wichtig sind, die besonders im Fokus dieser Planungen standen: „Furthermore, these diagrams were static models; they did not address the *movement* of bodies, material, and equipment in the factory.“ [Pai 2002], S. 166 f.. Die Ausprägung des Gebäudes soll die funktionalen Eigenschaften erhalten. So wird beispielsweise das Panopticon nach Jeremy Bentham Mitte des neunzehnten Jahrhunderts, nach dessen Muster Fabriken und Gefängnisse gebaut wurden, von Michel Foucault als Repräsentation eines Kräftezusammenhangs gesehen, der auf eine Idealform abgebildet wurde. Konkret war das Ziel, eine Form zu finden, die die Anforderung nach möglichst effizienter Überwachung vieler Menschen (Arbeiter, Gefangene) durch möglichst wenige unerkannt bleibende Aufseher realisiert. „In other words, the Panopticon diagram is *function represented as form*“, also ein „completely functionalized space“ [Pai 2002], S. 169. Ziel war also, Raum um Funktionen anzureichern und Funktionen räumlich zuzuordnen, so dass im Beispiel der Fabrikarbeiter und das Fabrikgebäude passend zusammentreffen und allgemein ein effizientes Gebäude für den Anwendungszweck entsteht. Als Verfeinerung in diesem Zusammenhang stand die Passgenauigkeit der Arbeitsumge-

bung und somit auch der entsprechenden Gebäudeeinheit — heute würde man von Arbeitsplatzergonomie sprechen — im Fokus weiterer Optimierungen und Untersuchungen von Bewegungsabläufen der Arbeitnehmer. Callaghan und Palmer unternahmen Bewegungsstudien zur Beurteilung von Platzbedürfnissen, insbesondere in Zusammenarbeit mit Gilbreth zu Küchenstudien. Fredericks Beschreibungen zu Abläufen im Rahmen der Hausbewirtschaftung in Form von *Routing Diagrams* wurden Ende der 1920er Jahre auch in Deutschland aufgegriffen im Rahmen von Studien der Reichsforschungsgesellschaft, insbesondere durch Alexander Klein, mit Veröffentlichung unter dem Titel „Illustrations of German Efficiency Studies“ und führten zur Aufnahme von Funktionsdiagrammen in den Diskurs über den Architekturentwurf [Pai 2002], S. 178 f..

Zur Ausweitung der funktionalen Planung nach Taylor wurde behauptet, dass Abläufe in Verbindung mit der Gebäudenutzung und entsprechenden Bewegungen im Gebäude nicht so „funktionalisiert“ werden können wie in Fabrikgebäuden. „The key is to understand that when Taylorism expands beyond the factory, its functional, visual, and institutional rules can no longer be sustained. There are two quite simple explanations for this. First of all, the movements involved in most institutional routines, no matter how simplified, cannot be functionalized in the manner of the factory.“ [Pai 2002], S. 180.

Der Entwurf eines Einfamilienhauses als übersichtliches, aber vielfältig ausgeprägte Lebensprozesse beherbergendes Gebäude hat Pattison um 1915 zu Untersuchungen zum Thema Familienleben in einem Haus veranlasst, wobei sie eine Einteilung des Lebens in „essential sides“ vorgenommen hat. Die Zuordnung erfolgte aufgrund der sichtbaren Aktivitäten im Familienleben: „A room was thus defined by its designated activities“ [Pai 2002], S. 185, wobei die Möblierung in den Gestaltungsgedanken eingeschlossen ist. „For Pattison, the task of planning the house was a matter of separating and reintegrating the units rooted in the basic needs of its occupants. The plan of the home could therefore be construed as a physiological map of the human body, and routing as the pursuit of a symbiotic relation between human movement and its environment“ [Pai 2002], S. 186. Die von Pai zitierte Studie „Family Living as the Basis for Dwelling Design“ der John B. Pierce Foundation greift den Ansatz des funktionalisierten Entwurfs von Pattison auf als „*functionalist theory*“ und beschreibt, dass ein Haus so geplant werden sollte, dass es zu den Aktivitäten einer Familie passt wie ein maßgeschneiderter Anzug. Es werden Räume für bestimmte Zwecke spezifiziert, so dass der Anspruch eines „scientifically designed“ Wohnungsbaus formuliert werden kann. Die Ergebnisse wurden 1943 mitveröffentlicht durch Callaghan und Palmer unter dem Titel „Measuring Space and Motion“. Allerdings werden hier neben funktionalen Anforderungen dem menschlichen Körper die Eigenschaften eines räumlichen Objekts zugemessen. Beide Anforderungen bestimmen schließlich die räumliche Gestaltung, [Pai 2002], S. 191–193. Frederick und Pattison fokussieren den funktionalisierten Körper, Callaghan und Palmer fokussieren Raumbedürfnisse von Funktionen zum Entwurf des Gebäudes.

Ein weiteres Diagramm ist das *Space Relation Diagram* von Caudill, welches nicht die Raum-Funktionszuordnung, sondern Raum und Distanz repräsentiert und den Raumbereichen Charakterisierungen zuordnet, z. B. eine Ruhezone.

Nach dem Ausgangspunkt der Repräsentation des funktionalisierten Körpers veränderte sich der Modellierungsgegenstand weg von physischen Gebäudeobjekten hin zu nicht zum Gebäude gehörenden Modellierungsgegenständen, etwa der Bewegung, Aktivitäten der Bewohner, Luftströmungen und Lichtverläufen. Durch entsprechende Diagrammdarstellungen, insbesondere Luftströmungen, wurde ein Gebäude auch als atmende Maschine metaphorisch aufgefasst und so zu einem Element der Prozesse, die in dem Gebäude ablaufen und durch das Gebäude unterstützt werden, sei es eine Schule, eine Zahnarztpraxis oder ein Einfamilienhaus. „If scientific management's metaphor paired the body with the machine, in architecture the building took the place of the body.“

[Pai 2002], S. 195. Die Metapher von einer architektonischen Maschine lässt sich auf verschiedene Gebäudetypen anwenden, etwa Fabriken, Bürogebäude, Krankenhäuser etc.. Nach Pai hilft die Metapher von Architektur als mechanischem Apparat, eine Verbindung zwischen der Sicht von einem funktionalisierten Körper (Gilbreth etc.) und von einem funktionalisierten Raum (Beispiel des Panopticons von Bentham) herzustellen: „It was through this metaphor that one could visualize and talk about the “function of a building.”“ [Pai 2002], S. 197.

Ein weiterer Schritt war die Auffassung des Entwurfs als rationalen und kreativen Prozess in drei Schritten durch Nelson um 1937: Erstens *Analyse ohne Architekturfokus*, um Lebensprozesse zu abstrahieren, zweitens *Architektur bezogene Analyse*, um räumliche Abstraktion herzuleiten und drittens *Architektur bezogene Synthese*, in der eine Konkretisierung in Architekturbegriffen erfolgt. Eine Repräsentation — Pai fokussiert das Diagramm — hat hierbei die Aufgabe, diesen Prozess zu unterstützen: „a process where the diagram performed its essential role as the translator of idea into form.“ [Pai 2002], S. 237. Ausgangspunkt des Entwurfsprozesses ist aber die Repräsentation der Funktionen der betrachteten Lebensprozesse: „What he did insist was that the diagram was devised *before* the axonometric design; a form unprejudiced by existing typologies, borne from the “spiritual and material functions of the life in question.”“ [Pai 2002], S. 239, ¹¹.

Aus Studien der US-amerikanischen Housing Division der Public Works Administration Mitte der 1930er wurden zum einen Checklisten für die Planung von Apartments entwickelt. Dies unterstützend veröffentlichte die National Association of Housing Officials Empfehlungen unter der Annahme: „families did not know what they really wanted or that their demands were so varied and unreasonable that they formed “no sane basis for design.”“ [Pai 2002], S. 241. Ziel war die Größenbestimmung und Anzahl letztlich minimal, aber ausreichend dimensionierter Wohneinheiten. Beispielpläne (passenderer Begriff aus Sicht des Autors ist Musterpläne) dienten als Vorlagen für den Entwurf. Der Entwurf verlief vom Programm über das Diagramm zum Plan. Dabei startete der Prozess mit der Bildung von Raumeinheiten *aus verbalen Beschreibungen*, im Beispiel eines Einfamilienhauses Wohnzimmer, Küche, Schlafraum etc.. Die Repräsentation dieser Einheiten erfolgte als Bubbles in einem sogenannten *Bubble Diagram*, wobei keine Dimensionsangaben repräsentiert wurden. Die Verbindungen zwischen den Einheiten wurden durch Linien zwischen den Bubbles dargestellt. Im folgenden Schritt wurde das Bubble Diagram auf einen Musterplan abgebildet. Die Architektur Firma Fordyce & Hamby hat einen entsprechenden methodischen Ansatz verfolgt, den Markt für verschiedene Hausgrößen zu bedienen, indem der *Nutzwert* der Immobilie in den Vordergrund gestellt wurde. Pai zitiert: „Architecture is space enclosed for a reason. And the reason is all-important. Recognizing the absence of any coordinated, scientific data on the “reasons” behind small house architecture, this study examines the house room by room, defines its space in terms of use. It makes no attempt to re-create the social order to fit the house, but, rather, re-creates the house to fit existing needs. ...“¹² [Pai 2002], S. 244, ¹² und schätzt ein: „For Fordyce and Hamby, the most important problem was utility, one that required the process of “fitting the space to the functions.”“¹³ [Pai 2002], S. 245, ¹³. Der gestalterische Entwurf und das Erscheinungsbild sei eine Ergänzung, die den Verkauf anrege und werde daher vorzugsweise durch Kundenbefragungen ermittelt und gestaltet, [Pai 2002], S. 251. Beiden Ansätzen ist gemeinsam die *Korrespondenz* einer *räumlichen Einheit* (bubble) und einer *verbalen Bezeichnung der Funktion*. Ebenso bleibt die Korrespondenz bei der Abbildung der Topologie einer Bubble auf einen Plan erhalten. „In other words, contrary to the notion that the diagram and the plan were distinct phases of the design process, there was a constant analogical continuity between the lines of the diagram and those of the plan.“ [Pai

11 Zu ⁴: Pai zitiert: Nelson, "A Method of Procedure in Architectural Design," p. 54-, [Pai 2002], S. 358

12 Zu ¹²: Pai zitiert: Allmon Fordyce and William I. Hamby, "Small Houses for Civilized Americans," *Architectural Forum* 64 (January 1936), ..., [Pai 2002], S. 359

13 Zu ¹³: Pai zitiert: Fordyce and Hamby, "Small Houses for Civilized Americans," p. 8, [Pai 2002], S. 359

2002], S. 247 f..

Die neueren Entwicklungen unter dem Begriff des BIM lösen die Unterscheidungen der Repräsentationen auf in einem angestrebten einzigen Modell, welches viele Sichten auf die interessierenden Modellierungsgegenstände erlaubt. Pai geht auf BIM nicht explizit ein, aber die folgende Aussage kann auf BIM bezogen werden: „In modern architecture, the diagram has become form, and form has become a diagram. Though these two propositions may seem one and the same, they imply quite different ways of approaching architectural design. In the former, the architect's gaze remains centered on the line. And as we saw in the housing designs of this chapter, this concentration leads to what Le Corbusier has characterized as the “chimeric fixation on a *type-plan*.” Le Corbusier knew that this fixation would result in the most barren of solutions, and thus he insisted that technology and standardization establish “type elements,” not the type plan.²²“, [Pai 2002], S. 252,

¹⁴.

Vor diesem historischen Hintergrund wird im Folgenden auf die eingangs aufgeworfenen Fragestellungen eingegangen, um den Begriff des konzeptuellen Gebäudeentwurfs dieser Arbeit festzulegen.

Beginnend mit dem zuletzt aufgeführten Zitat sei klar definiert, dass die vorgestellte Modellierungsmethode in der Verwendung als Entwurfsunterstützung keinen Plan vorgibt. Ihr Fokus liegt auf der methodischen Modellierung von Gebäudenutzung und entsprechend auf Nutzungsfällen der Gebäudenutzer. Hierzu werden Modellierungsgegenstände herausgearbeitet, welche diese Modellbildung im Einzelnen erlauben. Ein wesentlicher Modellierungsgegenstand ist die Gebäudetopologie, in der von geometrischen und gestalterischen Sichten auf das Gebäude abstrahiert wird. In der Unterstützung des Gebäudeentwurfs als eine der möglichen Verwendungen der Methode liefert sie eine entworfene Gebäudetopologie in Diagrammform, welche die Nutzungsanforderungen erfüllt. Diese ist dann ein Ausgangspunkt für den geometrischen und gestalterischen Entwurf, wobei — wie noch in 5.3.3 beschrieben wird — dies kein linearer Prozess ist wie es bei früheren Ansätzen des letzten Jahrhunderts, etwa Taylor, angenommen wurde. Das Gebäudetopologie-Diagramm stellt eine Bedingung dar, die den Architekten unterstützt, einen Entwurf konstruktiv und gestalterisch zu finalisieren, um bei Beachtung der gebäudetopologischen Vorgaben die Nutzungsanforderungen bestmöglich zu erfüllen.

Damit ist die erste Frage nahezu beantwortet: „*Worauf fokussiert die Modellierungsmethode den Gebäudeentwurf?*“

Die Modellierungsmethode richtet den Gebäudeentwurf auf die Gebäudenutzung und damit zusammenhängende Modellierungsgegenstände. Diese werden sorgsam in 4.2 herausgearbeitet. Es handelt sich um Konzepte, die nicht den konstruktiven und gestalterischen Entwurf im Kern betreffen. Zwar gibt es Anknüpfungspunkte, die die Nutzung tangieren, etwa Raumgrößen oder Raumübergänge, und Abbildungsfragen zu BIM, die in der weiteren Arbeit behandelt werden.

Die Methode, die aufgrund eines Modells entworfen wird, ordnet sich in das etablierte Vorgehen des Architekturentwurfs nach [BIM 2015], S. 4, ein, wie in 5.3.3 und Abbildung 46 beschrieben. Ihre Verwendung hat die Schwerpunkte im Individual- und Spezialbau und zur Diagnose, wie in 5.3.4 erläutert.

Die zweite Fragestellung „*Was bedeutet Konzept im Zusammenhang mit dem Entwurf in dieser Arbeit?*“ lässt sich beantworten unter Bezugnahme auf Konzepte einzelner Etappen der oben dargestellten Historie. Die folgenden Konzepte haben mehr oder weniger begriffliche Nähe zu den in dieser Arbeit eingeführten Begriffen, die den Gesamtbegriff des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurf bestimmen.

¹⁴ Zu ²²: Pai zitiert: Le Corbusier, „*The Significance of the Garden-City of Weissenhof, Stuttgart*,“ *Architecture Vivante* (Spring/Summer 1928), translated in *Oppositions 15/16* (1979), pp. 201–203. ..., [Pai 2002], S. 360–361

Dies sind zunächst die *Modellierungsgegenstände*, die in 4.2 definiert werden. Diese umfassen Konzepte von *Space Functions*, *function of a building* und die *Korrespondenz einer räumlichen Einheit (bubble) und einer verbalen Bezeichnung der Funktion*.

Dies ist des Weiteren die in 4.4 begründet hergeleitete *Repräsentationsform*, die als graphische Form ähnlich wie *Bubble Diagrams* und *Functional Diagrams* den Zusammenhang zwischen Raum und Funktion darstellt — in diesem Ansatz wird das Konzept des Funktionsangebotes eines Raums eingeführt, beschrieben in 4.2 und 5.1.3. Insbesondere das Bubble-Diagramm hat Ähnlichkeit zu dem Diagramm des hier vorgestellten Modells. Gemeinsam ist die Repräsentation durch einen Graphen, wobei die Räume durch Knoten — im Bubble-Diagramm als Bubbles bezeichnet — dargestellt werden. Die Kanten im Bubble-Diagramm sind ungerichtet und repräsentieren Zusammenhänge wie Bewegung zwischen den Räumen. Die Ausdruckskraft in Bubble-Diagrammen erlaubt keine differenzierte Repräsentation von Raumübergängen, die für den Entwurf eine hilfreiche Unterstützung in der Beantwortung von Nutzungsfragestellungen ist, wie in dieser Arbeit herausgestellt wird. Die *Routing Diagrams* finden in diesem Ansatz keine ebenso statische Entsprechung in der Repräsentation des Gebäudeentwurfs. Der Gedanke der Spezifikation von Bewegungsabläufen findet sich aber wieder in dem hier vorgestellten Modell des Nutzungsfalls und in dem Modell der Gebäudenutzung, beschrieben in 5.1.4 bzw. 5.1.5, als Basis der Methode der Simulation, erläutert in 5.3.2.

Und dies sind schließlich Konzepte, die die *Methode*, das *Vorgehen* und die *Verwendung* betreffen. Diese Konzepte unterstützen den konzeptuellen Gebäudeentwurf. Ihre Ausprägung wird in 5.3 hergeleitet. Die Methode unterstützt die in der Historie genannte *Analyse ohne Architekturfokus* im ersten Schritt und die *Bildung von Raumeinheiten aus verbalen Beschreibungen*. Durch das methodische Vorgehen kann ein „scientifically designed“ *Wohnungsbau* als Verwendung unterstützt werden.

Es handelt sich sämtlich um *Konzepte*, welche die Mittel — Subjekte wie Objekte — des Entwurfs sind; keine Konstruktionslehre und keine künstlerisch-gestalterischen Mittel, auf denen diese Methode zum Entwurf basiert. Daher wird von *konzeptuellem Entwurf* gesprochen. Der Zusatz der *Nutzungsorientierung* wird im Folgeabschnitt 3.2 eingeführt.

Um den hier vorgestellten Ansatz des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs in eine aus Sicht des Autors dieser Arbeit wichtige Fragestellung Pais einzuordnen, sei Folgendes vorweggenommen:

— „We may then ask, at what point does the diagram become a plan?“ [Pai 2002], S. 248. —

In dieser Arbeit wird klar zwischen der Repräsentation der Gebäudetopologie für den nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurf durch ein Modell in Form eines Petrinetz-Diagramms einerseits und der Repräsentation durch ein BIM-Modell als Plan für das Gebäude andererseits unterschieden. Ein Vorschlag für die Abbildung zwischen Diagramm und Plan wird in 5.2 erarbeitet. Diese dort vorgestellte Abbildung ist keine eindeutige Abbildung, so dass die Repräsentation der Gebäudetopologie nach Pais folgender Aussage ein Diagramm ist, aber keine Festlegung der Form vorgibt: „Rather, we may conclude that if there is a diagram that can generate form, *such a diagram is already form*.“ [Pai 2002], S. 248.

3.2 Nutzungsorientierung

Eine Nutzungsorientierung im Architekturentwurf wird, wie in 3.1 zum Thema konzeptueller Entwurf im zwanzigsten Jahrhundert dargestellt, bisher ansatzweise definiert. Dabei handelt es sich um die Zuordnung von Raum und Funktion, um die Analyse von Bewegungsbedürfnissen des Menschen bei Tätigkeiten im Gebäude und um die wirtschaftliche Betrachtung des Nutzwerts eines

Gebäudes als Investitionsgut wie bei Fordyce & Hamby [Pai 2002], S. 243 ff..

Von der dort erfolgten konzeptionellen Betrachtung abgesehen wird Nutzungsorientierung aber durch Normen, Richtlinien und Empfehlungen im geometrischen Entwurf detailliert definiert und berücksichtigt. Neufert definiert in der Bauentwurfslehre [Neufert 2016] Muster für Grundrisse unterschiedlicher Gebäudetypen, Räume unterschiedlicher Verwendung, Raumübergänge wie Türen, Treppen, Fahrtreppen und Fahrsteige, bis hin zu Richtlinien für Einrichtungen in Maßen für die Möblierung, Nutzraumausstattung, etc., jeweils unter Berücksichtigung der erforderlichen Bewegungsanforderungen des durchschnittlichen Nutzers und insbesondere auch für behinderte Menschen und Erfordernisse der Barrierefreiheit. In 3.3 wird genauer auf den Zusammenhang zwischen diesen Begriffen und dem konzeptuellen Entwurf eingegangen. Diese Begriffe sind für den Übergang zwischen dem konzeptuellen und dem geometrischen Entwurf grundlegend, wobei die hier vorgestellte Methode für diesen Übergang BIM betrachtet, wie in 5.2 dargestellt.

Bevor der Begriff der Nutzungsorientierung definiert wird, sollen ähnliche Begriffe aus der historischen Darstellung in Bezug zu dem in dieser Arbeit entwickelten Modell gesetzt werden.

Die genannten *Space Functions* werden hier präziser als *Funktionsangebote* definiert, die Räumen zugeordnet werden. Räume werden auch in diesem Ansatz ohne geometrische Eigenschaften definiert, und lediglich die Kapazität wird modelliert. Auch die im Zusammenhang mit den *Bubble-Diagrammen* genannte Bildung von Raumeinheiten aus *verbalen Beschreibungen*, die eine Funktion der jeweiligen Einheit implizieren, beschreibt zumindest eine Funktionszuordnung. Auch bei Nelson wird die Repräsentation der Funktionen der betrachteten Lebensprozesse als Ausgangspunkt für wichtig erachtet. Formal definiert wird aber nicht, wie ein Nutzungsszenario aus Gebäudenutzern gestaltet ist. In einer neueren Arbeit von Schwaiger wird die Kopplung Raum/Funktion/Nutzung eng verbunden gesehen: „Die Systemkomponente „Funktion“ ist definitionsgemäß gleichzusetzen mit der Nutzung eines Gebäudes. Da ein Gebäude mehrere Nutzungen beinhalten kann, kann es auch mehreren Funktionsbereichen zugeordnet werden, z. B.: - wohnen - arbeiten - lagern - produzieren - verwalten“ [Schwaiger 2002], S. 44. Funktionen können nach Schwaiger unterschiedlich allgemein, für die Nutzung oder als Funktion von Gebäudeelementen — z. B. Wand trägt, schließt ab; Aufzug transportiert — aufgefasst werden. Eine Funktion habe „einen wesentlichen Einfluß auf die Gestalt, Konstruktion und Größe eines Gebäudes“, S. 44. Die Auffassung, dass Funktion gleichzusetzen ist mit Nutzung, wird in dem hier vorgestellten Ansatz nicht geteilt und differenzierter definiert. Der Einfluss von Funktion und Nutzung auf Gestalt, Konstruktion und Größe wird durch die hier vorgestellte Modellierungsmethode nicht abgebildet. Es wird aber eine Abbildung zwischen den Modellen der Nutzungsorientierung und dem BIM-Modell in 5.2 dargestellt. Der Einfluss soll nach Ansicht des Autors verantwortlich durch den Architekten bewertet und im Entwurf abgebildet werden. Die Modellierungsmethode gibt hierfür einen Rahmen vor, der die Gebäudetopologie mit Eigenschaften der Nutzungsorientierung, nicht aber die vollständige geometrische und gestalterische Ausprägung, umfasst, wie in 4.2, 5.1.2, 5.2 und 5.3.3 herausgearbeitet wird.

Mit *Functional Diagrams* wird keine Bewegung modelliert. *Bewegung* wird aber in diesem Ansatz als eine Form der Nutzung verstanden und definiert. Die *Routing Diagrams* repräsentieren Bewegungspfade in der Gebäudegeometrie. In dieser Arbeit wird Bewegung als eine Form der Nutzung definiert, als Anforderung durch einen Nutzungsfall spezifiziert und repräsentiert in einem Modell der Gebäudenutzung, 5.1.5, zur dynamischen Repräsentation durch die Methode der Simulation, 5.3.2.

Die Funktion des Gebäudes wird in einigen Ansätzen als Eigenschaft des Gebäudes aufgefasst, in anderen Ansätzen als Bedürfnisse dem Nutzer des Gebäudes zugeschrieben. Letzteres ist interessant für den hier vorgestellten Ansatz, der die Nutzungsorientierung am Nutzer formal definiert.

Callaghan, Palmer und Gilbreth fokussieren in den Bewegungsstudien den Nutzer, wenn auch priorisiert die geometrischen Anforderungen aus der Bewegung analysiert und hergeleitet werden. Frederick und Alexander Klein verfassen Beschreibungen zu Abläufen, z. B. im Rahmen der Hausbewirtschaftung, die für die Ausführung eines Nutzungsprozesses eine optimierte Anordnung von Objekten — abstrakt kann von Funktionen gesprochen werden — erzielen soll. Pattison orientiert den Entwurf eines Einfamilienhauses an den Bedürfnissen der Bewohner. Ähnlich zielen die Studien der US-amerikanischen Housing Division der Public Works Administration und die Empfehlungen der National Association of Housing Officials auf die Erkundung und Berücksichtigung der Anforderungen von Familien. Insgesamt schimmert ein im Entwurf zu berücksichtigendes Konzept durch, welches man als *Gebäudenutzungsanforderung* bezeichnen kann. Die detaillierte Beschreibung der unterschiedlichen und individuellen Anforderungen ist erforderlich. In der Informatik wird zur Modellierung solcher Nutzungsanforderungen das Konzept der Nutzungsfälle verwendet [UML 2016]. So wird auch in diesem Ansatz der *Nutzungsfall* zur Beschreibung der Gebäudenutzungsanforderung definiert. Der Nutzungsfall spezifiziert die geforderte Nutzung eines Gebäudes. Die Nutzung wird auch aus den historischen Zusammenfassungen deutlich: Offensichtlich ist die Nutzung von Funktionen, teilweise wird auch die Bewegung genannt. Dieser Ansatz definiert Nutzung als *Bewegung* oder *Funktionsnutzung*.

Dieser Ansatz stellt daher auch einen Gegenentwurf zu folgender These dar: „The key is to understand that when Taylorism expands beyond the factory, its functional, visual, and institutional rules can no longer be sustained. There are two quite simple explanations for this. First of all, the movements involved in most institutional routines, no matter how simplified, cannot be functionalized in the manner of the factory.“ [Pai 2002], S. 180. Die Behauptung, dass Abläufe in Verbindung mit der Gebäudenutzung und entsprechenden Bewegung im Gebäude nicht so „funktionalisiert“ werden können wie in Fabrikgebäuden, wird durch den hier vorgestellten Ansatz widerlegt. Dieser Ansatz definiert Metamodelle für die Modellierung des Gebäudes, seiner Nutzung, der Nutzungsfälle und der *Gebäudenutzung*. Letztere verbindet ein Gebäude, seine Nutzung und Nutzungsfälle, so dass in einer darauf aufbauenden Simulationmethode die Gebäudenutzung dynamisch repräsentiert, d. h., die in Nutzungsfällen geforderte Bewegung und Funktionsnutzung des Gebäudes dargestellt werden kann. Die durch das Modell der Gebäudenutzung hergestellte Verbindung von Gebäude und seiner Nutzung einerseits, die Bewegungsmöglichkeiten und Funktionsangebote umfasst, und der Nutzungsfall bestehend aus Bewegungs- und Funktionsnutzungsanforderung andererseits, kann anstelle der von Pai genannten Metapher als eine Modell basierende Verbindung zwischen der Sicht von einem funktionalisierten Raum (Beispiel Panopticon von Bentham) und von einem funktionalisierten Körper (Gilbreth etc.) respektive aufgefasst werden: „It was through this metaphor that one could visualize and talk about the “function of a building.”“ [Pai 2002], S. 197.

Zusammenfassend wird in dieser Arbeit die *Nutzungsorientierung* durch folgende Begriffe definiert. Die *Nutzung eines Gebäudes* beschreibt das Nutzungsangebot in Form von *Bewegungs- und Funktionsnutzungsangebot* eines Gebäudes. Eine oder mehrere Funktionen werden je als atomarer Begriff einem Raum zugeordnet, z. B. „Essen“, „Unterhaltung“, „Lesen“, „Fernsehen“ in einem Wohn-/Esszimmer, „Diagnose“, „Behandlung“ in einem Zahnarztbehandlungsraum oder „Anmeldung“, „Terminvereinbarung“ an einer Rezeption. Von ihrer Struktur und ihrem Umfang wird abstrahiert, weil dies nicht relevant ist für die grundsätzliche Nutzung einer durch einen Raum angebotenen Funktion. Die Festlegung der Begrifflichkeiten ist eine ontologische Aufgabe, die nicht Teil dieser Arbeit ist, weil sie den Ansatz nicht fördert oder verhindert. Die *Funktionsnutzung* kann in unterschiedlichen Nutzungsszenarien erfolgen: als einzelne Nutzung einer Funktion oder als gemeinsame Nutzung mit beliebigen Teilnehmern (z. B. Gäste) oder als Szenario aus Nutzern mit definierten Rollen (z. B. Beteiligte an einer Zahnarztbehandlung). Dabei stehen Bewegung und

Funktionsnutzung in einem möglichen Ablaufzusammenhang. Das Gebäude wird reduziert auf die für die Beschreibung der Nutzung relevante *Topologie* aus Räumen und Raumübergängen mit Verankerung von Funktionsangeboten an Räumen. Der topologische Zusammenhang zwischen Räumen und Raumübergängen ist Grundlage des *Bewegungsangebotes* des Gebäudes; hierauf geht 3.3 genauer ein. Die Anforderung der Nutzung wird durch *Nutzungsfälle* spezifiziert. Die Anforderung kann aus Bewegungsanforderungen und Funktionsnutzungsanforderungen bestehen, letzteres in den oben genannten Ausprägungen einzeln, gemeinsam oder als Nutzungsszenario. Man erwartet, dass Nutzungsfälle zu einem Nutzer gehören. In dieser Arbeit wird erklärt, dass vom Nutzer abstrahiert werden kann und nur eine Nutzerrolle einem Nutzungsfall zugeordnet werden muss. Der Nutzungsfall repräsentiert vollständig die Nutzeranforderung. Die *Gebäudenutzung* beschreibt die Verbindung von Bewegungsanforderung und -angebot sowie Funktionsnutzungsanforderung und Funktionsangebot. Die Modellierungsgegenstände im Kontext der Nutzungsorientierung werden in 4.2 definiert und in 5.1 in Metamodellen formalisiert.

3.3 Gebäude im Zusammenhang mit dem konzeptuellen Entwurf

Der nutzungsorientierte konzeptuelle Entwurf eines Gebäudes abstrahiert die Sicht auf das Gebäude auf eine Begriffswelt für die Modellierungsgegenstände dieser Methode. Die Modellierungsgegenstände werden in 4.2 definiert und stützen sich auf folgende Begriffe im Kontext eines Gebäudes. Es wird deutlich, dass die Abstraktion Aspekte bewusst auslässt und andere Begriffe und Eigenschaften vorbereitend auf die Definition der Modellierungsgegenstände heraushebt. Zur Einordnung dieser Begriffe wird das Standardwerk zur „Bauentwurfslehre“ verwendet, welches auf Neufert zurückgeht [Neufert 2016]. Wie in den vorhergehenden Abschnitten erläutert, wird im konzeptuellen Entwurf mit Begriffen und nicht mit geometrischen oder gestalterischen Konzepten modelliert. Eine Abbildung zwischen beiden Sichten ist allerdings möglich. Ein Ansatz wird in 5.2 gezeigt, der darstellt, wie eine Abbildung zwischen Modellen des hier vorgestellten Ansatzes und BIM erreicht werden kann. Für den konzeptuellen Gebäudeentwurf nach der hier vorgestellten Methode sind drei Oberbegriffe relevant, nämlich das *Gebäude*, der *Raum* und der *Raumübergang*. Diese Begriffe werden im Folgenden in Zusammenhang mit der klassischen, d. h. an Geometrie und Gestaltung orientierten Bauentwurfslehre gestellt und detailliert erläutert.

Zuvor sei begründet, warum diese Begriffe als besondere Modellierungsgegenstände relevant für den Ansatz sind. Das Gebäude ist trivialerweise Gegenstand des Entwurfs. Eine Verwendung der vorgestellten Methode umfasst Vorgehensweisen zur Unterstützung des Entwurfs unter Berücksichtigung der Nutzung des Gebäudes. Hier wird also das Gebäude als abgeschlossene Einheit vorausgesetzt. Die zweite wesentliche Verwendung zielt auf eine Diagnose der Nutzbarkeit eines gegebenen Gebäudes hin. Hier gilt dieselbe Voraussetzung. Der Raum ist nicht nur ein Teil des Gebäudes in geometrischer und gestalterischer Sicht, sondern Träger ihm zugeordneter Funktionen, wie dies auch in den historischen Ansätzen bereits definiert wurde. Der Raum ist auch Entität einer Abbildung zu einem BIM-Modell. Der Raumübergang ist ein abstrakter Begriff, der im Zusammenhang mit der Bewegung im Gebäude als Form der Nutzung verstanden werden soll. In 3.2 wurde Bewegung als Form der Nutzung definiert. Die Überprüfung der Nutzung hängt insbesondere von der Bewegungsmöglichkeit ab, die wiederum den Rahmenbedingungen des Gebäudes, genauer der Raumübergänge wie Türen, Treppen, etc. unterliegt. Daher ist der abstrahierte Begriff des Raumübergangs relevant. Auch der Raumübergang ist Entität einer Abbildung zu einem BIM-Modell.

Im Folgenden werden diese drei Oberbegriffe detaillierter betrachtet vor dem Hintergrund der in der „Bauentwurfslehre“ hierzu zu findenden Begriffe. Zur Veranschaulichung werden die Begriffe und ihre für den Ansatz als relevant erachteten Eigenschaften anhand von Abbildung 2 erläutert. Sie enthält Grundrisse als Bildzitate, da der Autor die Begriffe seiner Modellierungsmethode und seines

Realisierungsansatzes anhand von Grundrissen erläutern möchte, die mit [Neufert 2016] einer Quelle entstammen, die als Referenzwerk der Bauentwurfslehre geltend anerkannte Grundrissreferenzen enthält, die keinen Anlass geben, in ihrer Güte und Stellung als Referenz angezweifelt zu werden.

Der Begriff Gebäude stehe in diesem Ansatz für das Gebäude als Ganzes oder ausschnittsweise für einen Gebäudeteil. Für den Ansatz relevant ist die *Gebäudetopologie*. Die Topologie des Gebäudes besteht aus Räumen und Raumübergängen sowie Beziehungen zwischen jeweils Raum und Raumübergang. Für eine Modellierung einer Bewegung ist die Richtung der Beziehung relevant. Beispielsweise sehen bestimmte Gebäudebereiche eine Bewegungsrichtung vor, die durch entsprechende Raumübergänge wie Drehkreuze gesteuert wird. Die Beziehungsrichtung gibt die mögliche Bewegungsrichtung an. Die Topologie kann als Diagramm in Form eines Graphen dargestellt werden, der aus Knoten und Pfeilen (gerichtete Kanten) besteht. Die Knoten sind Räume oder Raumübergänge; es gibt also zwei Arten von Knoten, weswegen man von einem bipartiten Graphen spricht. Ein Pfeil stellt die Beziehungsrichtung zwischen den Knoten und damit die mögliche Bewegungsrichtung zwischen den Räumen dar. Ein beidseitiger Pfeil kann eine ungerichtete Bewegungsrichtung darstellen. In der Abbildung 2 werden die Begriffe Gebäude, Raum und Raumübergang in die Sichtweise dieses Ansatzes eingeordnet. Zur Veranschaulichung wurde in (i) ein vereinfachter Gebäudetopologie-Graph eingezeichnet. Anhand des einfachen Grundrisses kann schon gezeigt werden, dass auf Modellebene die Gebäudetopologie eine Veränderung erfährt, wenn die markierte Wand am Wohnzimmer (Raum „Wz“) entfällt. Dann nämlich kann in der Topologie aus zwei Räumen mit jeweiligen Kapazitäten ein Raum mit zusammengefasster Kapazität¹⁵ erzeugt werden. Auf methodischer Ebene ist ein Bottom-Up-Ansatz anzuwenden, d. h. aus geometrisch dargestellten Details wird die Topologie abgeleitet, und eine Veränderung des geometrischen Diagramms führt zu einer konsistenten — im Sinne der gewünschten Repräsentation — Anpassung eines Topologie-Diagramms. Dies wird in 5.3 genauer erläutert.

In der Gebäudetopologie ist der *Raum* eine der beiden Entitäten, die einen Knoten in dem Topologie-Graphen bilden. Wie in einem geometrischen Grundriss wird auch in einer topologischen Repräsentation ein Raum eindeutig bezeichnet, so dass ein eindeutiger Bezug im Modell möglich wird. Für die Nutzungsorientierung werden die Eigenschaften der *Kapazität* und der angebotenen Funktionen definiert. Die Kapazität hat einen statischen Charakter und steht in Korrespondenz mit einem geometrischen Modell. Dies wird bei der vorgeschlagenen Abbildung mit einem BIM-Modell in 5.2 berücksichtigt. Im Rahmen der diesem Ansatz zugrunde liegenden Zielrichtung einer Unterstützung des Entwurfs auch durch eine Simulationemethode ist die Betrachtung der tatsächlichen *Belegung* relevant. Die Belegung hat ihre Grenze durch die Raumkapazität. Denkbar ist eine variable Kapazität, etwa wenn die Nutzung zu mehr oder weniger geplanten Nutzern eines Raums während eines Nutzungsablaufs führt, z. B. Simulation der Beschränkung der Nutzerzahlen (Raumkapazität) aufgrund von auftretenden Gefahrensituationen im Verlaufe des Nutzungsablaufs. Die Zuordnung von *Funktionsangeboten* zu Räumen ist eine für die Nutzungsorientierung grundlegende Notwendigkeit. Im Grundriss sind Funktionsangebote nur durch Interpretation der Ausstattung erkennbar, wie im Beispiel der Abbildung 2, (ii.i) markiert. Auf die Gebäudetopologie bezogen soll von einer Zuordnung der *Existenz* eines Funktionsangebotes gesprochen werden, ohne die einzelnen Funktionen in der Topologie zu spezifizieren. Ohne auf die weiteren Details der in 5.1.2 und 5.1.3 geführten Metamodellbildung einzugehen, handelt es sich also um eine Entkopplung der Spezifikation der tatsächlichen Funktionsangebote, die pro Raum gesondert definiert werden. Dies bedeutet für das Topologie-Diagramm, dass dieses lediglich am Knoten des Raums eine Beziehung zu einem Knoten trägt, der die Existenz irgendeines Funktionsangebotes für diesen Raum repräsentiert. Dadurch wird eine auf das Minimum reduzierte Anreicherung des Topologie-Diagramms erreicht und die Spezifikation der Funktionsangebote zu Räumen in eine separate Darstellung

15 Ob Addition passend ist, entscheidet der Entwerfer.

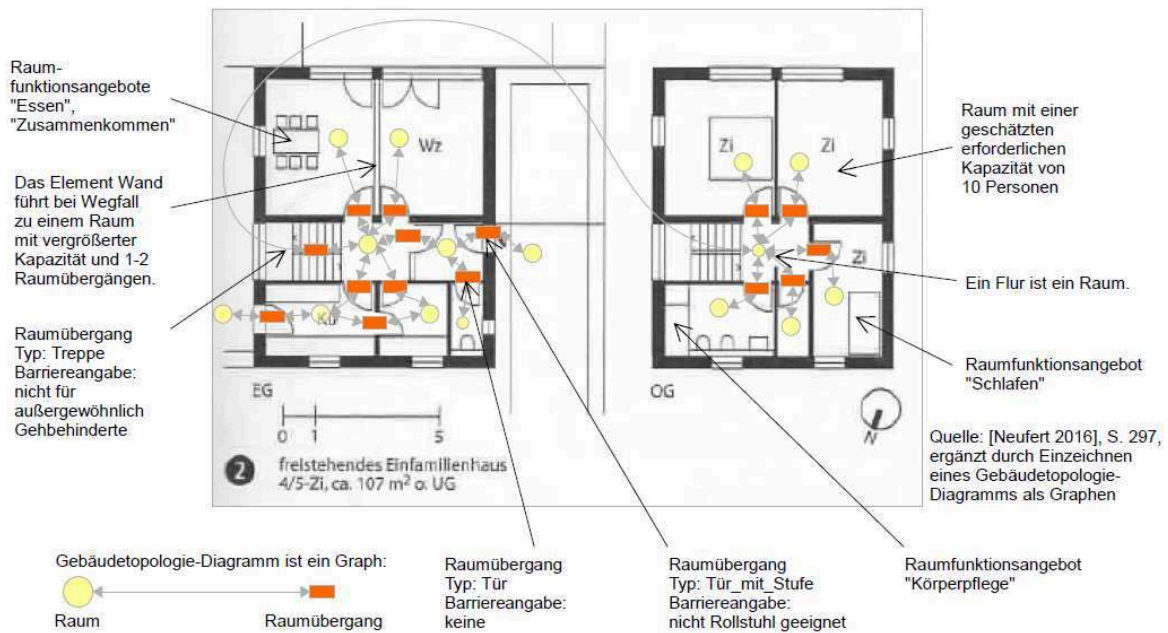
verlagert. Durch diese Eigenschaften wird ein Raum definiert. Eine weitere Eigenschaft ist, dass ein Raum in dieser Arbeit keine innere Bewegung repräsentiert. Sobald Bewegung zwischen Räumen modelliert werden soll, ist ein Raumübergang zwischen zwei Räumen zu bilden. So kann ein geometrisch als Einheit verstandener Raum eindeutig auf einen Raum im Begriffssinne dieser Arbeit abgebildet werden. Es kann aber auch ein solcher Raum aufgrund zu repräsentierender innerer Bewegung in mehrere Räume im Begriffssinne dieser Arbeit abgebildet werden. Anschaulich bedeutete dies, den geometrischen Raum in Raumabschnitte, z. B. ein Wohnzimmer in einen Kaminbereich und eine Essecke, aufzugliedern. Umgekehrt kann auch in einer grobgranularen Sicht ein Geschoss als Raum im Begriffssinne dieser Arbeit repräsentiert werden. Es ist eine Frage der gewünschten oder für die Modellierungsaufgabe erforderlichen Detaillierungstiefe, die durch das methodische Vorgehen, etwa nach der Top-Down- oder Designfokus-Methode¹⁶, erreicht werden soll.

Der *Raumübergang* ist in der Gebäudetopologie die zweite Entität, die einen Knoten in dem Topologie-Graphen bildet. Der Raumübergang wird in einem geometrischen Modell durch Bauteildarstellungen repräsentiert. Bauteile sind in dem Zusammenhang Türen, insbesondere Sondertüren wie Drehtüren, des weiteren Treppen, Fahrtreppen, Fahrsteige und Aufzüge. Die geometrischen Angaben wie z. B. von Türen die Aufschlagrichtung, Anschlagsart, Türumrahmung oder Türblattkonstruktion sind irrelevant. Für die Bewegung als Nutzung ist aber der *Übergangstyp* relevant, weil er durch einen Begriff den Übergang definiert. Als Typ wird ein Begriff der oben genannten Bauteile eingesetzt. Eine Begriffssystematik — etwa eine Hierarchie — dieser Typen wird die Zuordnung unterstützen. So wäre definiert, dass eine „Tür“ Oberbegriff einer „Außentür“ ist. In der Modellbildung in 5.1.2 wird auf den Zusammenhang zur Nutzung eingegangen. In Abbildung 2, (i), (ii.ii) und (iii.i) sind Beispiele genannt. Diese zeigen auch die zweite für die Modellierung der Bewegung als Nutzung relevante *Barriereangabe*. Diese soll den Raumübergang begrifflich beschreiben hinsichtlich möglicher Nutzungseinschränkungen, die mit der geometrischen Charakteristik korrespondiert, so dass ohne geometrische Angaben die Nutzungsmöglichkeiten in einem Modell abgebildet werden können. Weitere Beispiele sind Angaben wie „uneingeschränkt“, die spezifiziert, dass der Übergang eine uneingeschränkte Bewegung unterstützt, d. h., Nutzer ohne Einschränkungen in ihrer Bewegung den Übergang nutzen können. Eine Angabe „Kinderwagen“ würde Fahrtreppen *nicht* zugeordnet werden, da sie nicht für die Mitnahme von Kinderwagen zugelassen sind. Darüber hinaus ist ein Raumübergang eindeutig zu bezeichnen, um einen eindeutigen Bezug im Modell herzustellen.

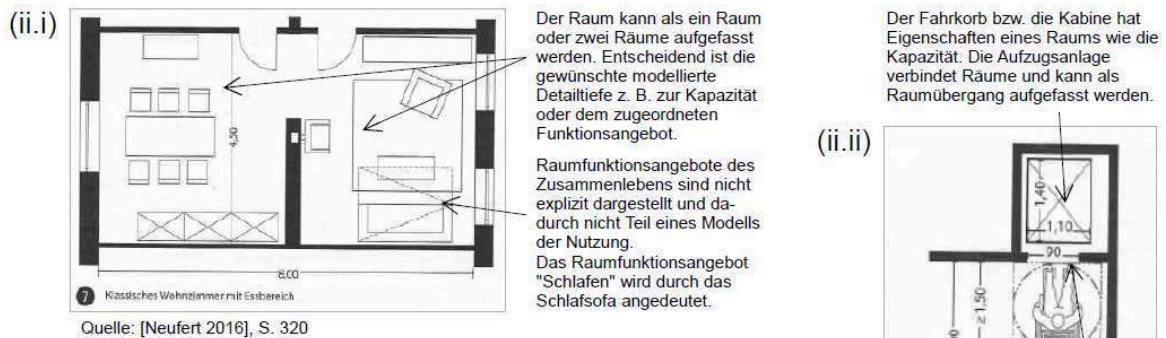
Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die Methode zur Modellbildung einer Gebäudetopologie Entwurfsentscheidungen unterstützen muss. So ist, wie in Abbildung 2, (ii.ii) zu einem Aufzug, und (iii.ii) zu einem Podest erklärt, die Modellbildung nicht immer eindeutig. Es gibt *besondere Objekte der Gebäudetopologie*, die als Raum oder Raumübergang modelliert werden können. Ein Aufzug ist aus Sicht der Bewegung zwischen Räumen ein Raumübergang, aber aus Sicht der Raumeigenschaften ein Raum mit einer Kapazität und selbst einem Raumübergang in Form einer Tür. Im Zuge der Definition des Metamodells der Gebäudetopologie in 5.1.2 werden Entscheidungshilfen für einige besondere Objekte der Gebäudetopologie dargestellt (Abbildung 15). Für die Modellierung der Nutzung in Form der Bewegung ist der Modellierungsgegenstand der *Berechtigung* für einen Raumzutritt, also für einen Raumübergang, relevant. Nutzungsfälle in öffentlichen oder geschäftlich genutzten Gebäuden sind abhängig von Einschränkungen dieser Art. Die Berechtigung dient auch der Modellierung veränderlicher Gebäudeaufteilungen durch geänderte Zugangsmöglichkeiten unabhängig von festen Wänden, sondern nur durch bedingte Zutrittsmöglichkeiten durch Türen. Berechtigungen sind in geometrischen Repräsentationen nicht dargestellt und auch nicht Bestandteil der Topologie. Sie sind aber in einem Metamodell der Nutzung vorzusehen.

¹⁶ Die Methoden sind in 4.1 und 5.3.2 beschrieben bzw. in Bezug zu diesem Ansatz gestellt.

- (i) **Gebäude, Gebäudeteil:** Sicht als Topologie aus Räumen und Raumübergängen. Funktionsangebote sind nur aus der Ausstattung ableitbar.



- (ii) **Raum:** Aus der vorgesehenen Nutzung ist die zu erwartende Kapazität ableitbar. Sie ist ein relevanter Modellierungsgegenstand. Das Funktionsangebot ist eine Entität, deren Existenz für einen Raum nicht im Grundriss dargestellt wird und nur aus der Ausstattung ableitbar ist.



- (iii) **Raumübergang:** Abstraktion auf die Entitäten Übergangstyp und Barriereangabe, die für die Bewegung als Nutzungsform relevante Modellierungsgegenstände sind.

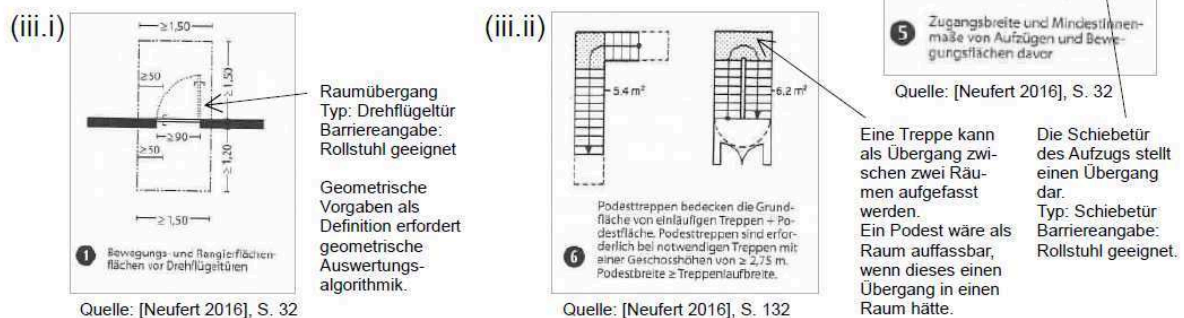


Abbildung 2: Gebäude im Zusammenhang mit dem konzeptuellen Entwurf

3.4 Aktueller Stand der Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs

Im Zuge der Beschreibung des in dieser Arbeit verwendeten Begriffs des konzeptuellen Gebäudeentwurfs in 3.1 wurden unterstützende Modellierungskonzepte aus der Historie genannt. Der konzeptuelle Gebäudeentwurf wird auch durch weitere Ansätze — bis hin zu aktuellen und zunehmend durch die Informatik fundierten Lösungen — unterstützt. Diese Ansätze werden im Folgenden dargestellt und in Bezug zu der in dieser Arbeit verfolgten Modellierungsmethode gestellt. Eine präzise vergleichende Abgrenzung erfolgt aber erst in 4.5 nach der genaueren Definition der Modellierungsgegenstände und der Herleitung der Basis der methodischen Modellierung des hier vorgestellten Ansatzes. Alle nun vorgestellten Ansätze sind ähnlich bezüglich der unterstützten Phase des Architekturentwurfs und haben ähnliche Bestrebungen wie der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz, der sich aber wesentlich durch Betonung der methodischen Modellierung der Nutzungsorientierung im Gebäudeentwurf abgrenzt, wie in 4.5, insbesondere in Tabelle 12 auf Basis der folgenden Ausführungen dargestellt wird. Alle Bestrebungen der Ansätze zur Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs haben folgende Motive gemeinsam.

Erstens steht die *Berücksichtigung der Anforderungen an das Gebäude* im Vordergrund. Dies sind Anforderungen an die Funktion und Aufgabe des Gebäudes, die Grundrissgestaltung und weitere Anforderungen, die hier nicht weiter betrachtet werden wie Konstruktion, Einhaltung von Richtlinien, Umwelanforderungen etc..

Zweitens ist die *Vermeidung von Entwurfsfehlern* wichtig, d. h. bereits im Entwurf sollen falsche Entscheidungen hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen vermieden werden. Insbesondere ist die Nutzung durch passende Raumaufteilung und Zuordnungen von Funktionsangeboten ein Anforderungsbereich, der möglichst präzise vorausgedacht, beschrieben, analysiert und mit den Beteiligten gemeinsam festgelegt werden soll.

Drittens ist eine *Optimierung der Kosten* wichtig. Dies gelingt im Kontext des Entwurfs dadurch, dass Änderungen in späteren Phasen vermieden werden und der Entwurf so präzise Ergebnisse liefert, dass nicht erst im Laufe der Bauausführung oder während der Nutzung bzw. Bewirtschaftung Defizite zu Änderungsaufwänden führen. Es ist eine grundsätzliche Erkenntnis wie nachfolgend auch zitiert, dass die Korrekturkosten mit dem Fortschritt eines Realisierungsprojektes zunehmen.

Die Berücksichtigung der Anforderungen an die Nutzung erfordert nach Joedicke, dass der Architekt in seinem „Vorgehen beim Entwerfen“ [Joedicke 1993], S. 34 ff., die Betrachtung der Nutzer und der Aufgabe und Funktion eines Gebäudes an den Anfang des Entwurfsprozesses stellt: „Zu der eher >>objektiven<< Seite der Voruntersuchungen gehört die Auseinandersetzung mit der Aufgabe, mit der Funktion eines Gebäudes. Ich selbst habe die Erfahrung gemacht, daß es in der Anfangsphase eines Entwurfs sinnvoll ist, sich eher allgemein mit der Aufgabenstellung auseinanderzusetzen, also nur mit der grundsätzlichen Ausbildung und Anordnung großer Raumbereiche, und die detaillierte Auseinandersetzung mit dem Raumprogramm erst dann vorzunehmen, wenn sich erste Vorstellungen abzuklären beginnen.“, S. 35. Diese Sicht unterstützt den Ansatz in dieser Arbeit, die Gebäudetopologie und die Zuordnung von Funktionen zunächst auch ohne detaillierten Grundriss zu betrachten, um zu einem Verständnis der Nutzungsanforderung zu gelangen. Dies kann den Architekten unterstützen, wenn er wie Joedicke es der Rolle eines Architekten beimisst, die Anforderungen des Nutzers berücksichtigt und vertritt: „Der Bauherr oder der Auslober eines Wettbewerbes wird im allgemeinen seine Vorstellungen und Wünsche formulieren. Er wird dabei, so ist es jedenfalls zu hoffen, auch auf die Wünsche und Vorstellungen der Nutzer eingehen, also derjenigen, die das Gebäude benutzen. In Zusammenarbeit mit dem Bauherren sollte der Architekt seine Rolle stets als Anwalt der Nutzer verstehen ...“, S. 35. Im Entwurfsprozess formuliert Joedicke ein Vorgehen, dass auch als iterativer und inkrementeller Prozess des Entwerfens verstanden werden kann: „Im Normalfall beginnt ein Architekt mit ersten

Überlegungen, versucht sie zu präzisieren, merkt, daß Widersprüche auftreten, vergleicht, überprüft und ändert. Es kann sein, daß Aspekte, die der Architekt übersehen oder gering eingeschätzt hat, im Verlauf des Entwurfsprozesses eine besondere Bedeutung bekommen. Denn die Probleme beim Entwerfen sind nicht vorher eindeutig bestimmbar, sie werden dem Architekten erst beim Entwerfen bewußt und verändern sich durch neue Erfahrungen beim Entwerfen.“, S. 36. Die hier vorgestellte Methode verwendet Basismethoden des Architekturentwurfs, die genau dieses Vorgehen unterstützen. Die genannte Unvollständigkeit und Ungenauigkeit in der Erfassung der Problemstellung und die sich verschiebenden Prioritäten während des Entwurfsprozesses können Ursache der eingangs genannten Motive sein, diese Phase zu verbessern. Mit Blick auf die Erfassung der Nutzeranforderungen ist die detaillierte Spezifikation der Anforderungen der Nutzungsfälle eine wesentliche Unterstützung der Entwurfstätigkeit des Architekten, diese Problemfelder des Entwerfens zu behandeln, indem präzise Nutzungsfälle frühzeitig in einem möglichst formalen und dennoch bezüglich der gestalterischen und konstruktiv-technischen Entwurfsaspekte möglichst wenig einschränkenden Gebäudemodell geprüft werden können. Diese Arbeit stellt eine Modellierungsmethode mit einem zugrunde liegenden Metamodell vor, welches diese Unterstützung bieten kann, wie in 5.3 erläutert wird.

In der Vergangenheit wurden in der Architekturforschung verschiedene Methoden und Modelle entwickelt, um den Entwurfsprozess formal zu unterstützen. Eine ganze Reihe von Ansätzen haben die formale Beschreibung von Gebäuden oder Grundrissen und deren Entwurf bis hin zur angestrebten Generierung nach Regeln und Mustern zum Gegenstand, darunter die Pattern Language und Shape Grammars. Moelle gibt in seiner Dissertation einen Überblick über zahlreiche Ansätze für „Rechnergestützte Planungsprozesse der Entwurfsphasen des Architekten auf Basis semantischer Modelle“ [Moelle 2006]. Er geht auf die genannten Konzepte ein. In dieser Arbeit soll dies nicht wiederholt werden, sondern nur die Aspekte betont werden, die die hier vorgestellte Methode motivieren oder sich deutlich unterscheiden. Moelle nennt auch den viel beachteten Ansatz von Christopher Alexander, den er in seinem Werk „A Pattern Language“ [Alexander 1977] ausgearbeitet hat: „In seinem Buch A Pattern Language ... (1977) schlägt Alexander Muster (Patterns) vor, in denen er den „Schlüssel zum Prozeß der Formfindung“ sieht. Er bietet 253 Muster an, beginnend mit der Region, über die Stadt, Stadtquartiere, Gebäude, Konstruktion, bis hin zu Ausstattungsdetails wie Fußleisten. Die Muster sind nicht als Regeln, sondern als „Strukturen von Argumenten“ zu verstehen. Ein Pattern ist jeweils durch das Problem (den Konflikt), die Lösung und die Begründung beschrieben.“ [Moelle 2006], S. 173 f.. Dieser Ansatz verfolgt wie auch spätere Ansätze die Idee, eine Logik für Entwürfe zu finden und diese in Mustern zu formulieren. Dabei möchte man möglichst nur eine Menge an Entwürfen beschreiben, die definierte gute Eigenschaften haben. Der Entwurfsprozess kann dann auf Basis dieser Muster zu diesbezüglich konsistenten Entwürfen führen.

Flemming entwickelte mit den Shape Grammars eine Formalisierung der Beschreibung von Gebäuden und architektonischen Formen zur Computerunterstützung für den Vorentwurf [Flemming 1994]. Die Ableitung des Beschreibungsformalismus der Shape Grammars (Form-Grammatiken) orientierte sich an mathematischen Grundlagen der Informatik wie der Aussagenlogik und Prädikatenlogik erster Ordnung. Fleming stellt eine Grammatik vor, die den Haustyp des Queen-Anne-Hauses spezifiziert. Die Erkenntnis ist, dass es leicht sei, eine Grammatik zu erstellen, die die Grundrisse erzeugt, die man erzeugen möchte; aber es sei schwer, zu vermeiden, dass die Grundrisse erzeugt werden, die nicht zum Typus gehören, die man also nicht erzeugen möchte [Flemming 1987a], Kap 3.5 Comments. Zwei praktische Ziele wurden verfolgt: Erstens die Möglichkeit, aus dem formalisierten Wissen um geeignete Grundrisse oder Gebäude neue Grundrisse oder Gebäudeformen zu erzeugen, von denen man dann annehmen konnte, dass sie ähnlich gute Grundrisse oder Gebäude darstellten, weil sie in den Erzeugnisraum fielen, der durch das Regelwerk guter Grundris-

se oder Gebäudeformen beschrieben wird. Zweites Ziel war, die Qualität eines Gebäudeentwurfs nach objektiven Kriterien bewerten und die Einhaltung von durch die Grammatik beschriebenen Entwurfsmustern prüfen zu können. Kann der Grundriss oder die Gebäudeform durch das Regelwerk erzeugt werden, galt der Grundriss als objektiv von passender Qualität [Flemming 1987b]. Der Ansatz zeigt, wie der graphische Entwurf durch Shape Grammars spezifiziert werden kann. Flemming beschreibt, dass eine Grammatik iterativ entwickelt werden muss: „It is likely that during this process, the grammar under development will undergo numerous revisions, and it is exactly these revisions that, I believe, lead to a deeper understanding of the issues at hand than is possible with traditional, more intuitive approaches.“ [Flemming 1987b], S. 251. Beide Ziele unterstützt die hier vorgestellte Modellierungsmethode bezüglich der Gebäudenutzung auf Basis einer formalen Beschreibung von Gebäudetopologie und Nutzungsfällen. Dabei erfolgt die Generierung einer Topologie nicht automatisch, wird aber durch ein methodisches Vorgehen auf Basis der Modellbildung unterstützt, wie in 5.3 gezeigt wird.

Mitchell verfolgte die Idee, aus der sprachlichen Beschreibung eines Gebäudes mit Computerunterstützung einen Entwurf abzuleiten [Mitchell 1990]. Mitchells Ziel war die Unterstützung des Entwurfsprozesses durch Berechenbarkeit. Der Ansatz ist, ein Gebäude mit Worten auf Basis einer Formelsprache zu beschreiben, die vom Computer verstanden und zu Entwürfen genutzt werden kann. Grundlage sind Ideen moderner Logik und Künstlicher Intelligenz zur computergestützten Verarbeitung von natürlicher Textsprache¹⁷. Die Informatik-Forschung der Künstlichen Intelligenz hat im Umfeld der Sprachverarbeitung von Texten und der Aufstellung von Regelwerken, die menschliches Sprachverständnis nachahmen oder abbilden, seit den 1960er Jahren immer wieder interessante Konzepte und Modelle hervorgebracht. In sprachlich gut definierten Domänen, wie der Medizin, hat dies auch zunehmend zu guten Konzepten geführt, wie beispielsweise in [Frank 1995] dargestellt, einer Arbeit, die der Autor wenige Jahre nach den Ansätzen von Mitchell verfasst hat.

Die genannten Konzepte Pattern Language und Shape Grammars und Mitchells Ansatz haben gemeinsam mit dem hier vorgestellten Ansatz, passende Entwürfe zu entwickeln oder zu suchen und zu prüfen. Dabei wird ein optimaler Grundriss angestrebt, den man durch Rückgriff auf bewährte Lösungen anstrebt zu finden. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass in der hier vorgestellten Methode Nutzungsanforderungen den Ausgangspunkt darstellen. In den o. g. Ansätzen geht man davon aus, dass bewährte Lösungen bereits Nutzeranforderungen erfüllt haben und daher durch Verwendung einer Klasse bewährter Grundrisse die Nutzungsanforderungen erfüllt werden, wenn aus den angebotenen Varianten an Grundrissen oder Gebäudeformen anhand der Anforderung der Passende ausgewählt wird. Somit ist der Bewertungsgegenstand der Grundriss oder die Gebäudeform. Nutzungsfälle, die Bewegung und Funktionsnutzung spezifizieren, werden nicht formal erfasst oder geprüft.

Joeng und Ban stellen einen Ansatz vor, der auf der Theorie der Space Syntax [Hillier Hanson 2005] basiert und den Architekten beim Entwurf unter Nutzung von CAAD darin unterstützen soll, den Grundriss nach sozialen Anforderungen zu gestalten: „Thus, this study demonstrates the possibility of determining the social properties and accessibility of spaces during the process of computer-aided architectural designing to meet client requirements by extracting topological information from building information model and performing Space Syntax analysis for evaluating alternatives using the information.“ [Joeng Ban 2011], Abstract. Sie stellen einen Algorithmus vor, der topologische Informationen aus dem Modell des Gebäudes extrahiert, indem diese aus den räumlichen Informationen des im IFC-Standard gespeicherten Gebäudemodells abgeleitet werden. Aus dieser Information wird ein Graph aufgebaut, der mit Bezug auf einen Startpunkt des Grundrisses die Erreichbarkeit der Räume repräsentiert, insbesondere die Zahl an Räumen, die

¹⁷ Siehe auch [Moelle 2006], S. 180 ff.

passiert werden bis alle Räume erreicht sind. Hieraus lässt sich ablesen, ob ein Raum abseits angeordnet ist, also wenig Bewegungsnutzung ausgesetzt ist, oder sehr stark frequentiert wird. Der Graph repräsentiert durch seine Tiefe diese Intensität der Bewegungsnutzung des Raums. Zur Bewertung stellen Joeng und Ban Kenngrößen auf, die aus der Tiefe des Graphen und der Knotenzahl errechnet werden. Darunter ist der Integration Value ein Indikator für den Öffentlichkeitsgrad eines Raums: Wenn er hoch ist, indiziert er, dass der Raum dazu tendiert, das Gesamtsystem an Räumen zu integrieren und öffentlicher zu sein. Insbesondere diese Kenngröße ist Grundlage zur Bewertung und zum Vergleich möglicher Grundrisse, die im Entwurfsprozess entwickelt und abgewogen werden.

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Ansatz hat der Ansatz von Joeng und Ban das Bestreben gemeinsam, Nutzeranforderungen in den Grundrissentwurf durch ein formales Modell einzubeziehen. Der Integration Value wird bei der Anordnung der Räume oder Ausprägung von Raumübergängen im CAAD Entwurf direkt einbezogen. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass die Optimierung nur anhand des Grundrisses bzw. Gebäudes erfolgt. Die Nutzung in Form von spezifizierter Bewegung oder Nutzung von Räumen zugeordneten Funktionsangeboten wird nicht berücksichtigt.

Die Arbeit von [Steinmann 1997] „Modellbildung und computergestütztes Modellieren in frühen Phasen des architektonischen Entwurfs“ verfolgt die Unterstützung des Vorentwurfs durch Modellbildung zum funktionalen Entwurf und der Überleitung zu einem geometrischen Bauwerksmodell. Der Modellansatz hat eine große Ähnlichkeit in der Zielsetzung zu dem Ansatz dieser Arbeit, aber unterscheidet sich ganz wesentlich dadurch, dass die hier vorgestellte Modellierungsmethode die Modellbildung über Funktionspläne hinaus um die formale Modellierung von Nutzungsfällen und die Gebäudenutzung sowie die Methode der Simulation zur Prüfung und Bewertung eines Entwurfs hinsichtlich der Nutzung erweitert. Die Gemeinsamkeiten liegen in der Vorstellung eines methodischen Ansatzes zur Modellbildung. Der Ansatz in jener Arbeit basiert auf objektorientierter Modellierung. Die Motivation liegt in der Erkenntnis der Bedeutsamkeit der frühen Entwurfsphase und dort getroffener Entscheidungen: „Obwohl technisch schlecht unterstützt, sind gerade die frühen Phasen des Entwurfs prägend für die Qualität und den Preis des Bauwerks sowie für die späteren Kosten für Betrieb, Modernisierung bis hin zur Entsorgung. Die Entscheidungen der frühen Planung determinieren zu ca. 90% die Gesamtbaukosten und dies zu einem Zeitpunkt, wo erst ca. 2% der Herstellungskosten durch die entsprechenden Planungskosten entstanden sind, ...“, S. 5. Die Modellierung der Funktionen eines Gebäudes werden auch in Steinmanns Arbeit priorisiert. Dabei wird der Charakter des zu unterstützenden funktionalen Entwurfs in Kapitel 3.1 deutlich: „Damit wird eine Topologie beschrieben, die i.allg. zwischen Raumgruppen, Räumen oder Raumzonen realisiert werden soll. Die ‘bubble diagrams’ enthalten neben rein topologischen auch (wenige) geometrische Informationen, wie Fläche und Proportion der Nutzungselemente (dargestellt durch Größe und Form der Graphknoten) sowie deren Orientierung im Grundriß (Lage der Knoten). Die Beschreibung der Nutzungseinheiten erfolgt in textuellen, symbolischen und numerischen Daten. Für Funktionsmodelle liegt ein sehr hoher Abstraktionsgrad vor.“, S. 28. Die Topologie des Gebäudes ist in dem Ansatz Basis der Modellierung funktionaler Eigenschaften und Abläufe zur Nutzung der Funktionen. Sie wird repräsentiert durch einen sogenannten Funktionsplangraphen, der aus den Bubble Diagrams abgeleitet wird: „Als funktionale Spezifikation von Bauwerken kann ein Graph (‘bubble diagrams’) verstanden werden, dessen Knoten räumlich-strukturellen Einheiten entsprechen. Die Kanten dieses Graphen beschreiben Relationen zwischen Modellobjekten, die gelten bzw. gelten sollen. Knoten und Kanten werden in der planerischen Praxis näher durch textuelle oder grafischen Annotationen beschrieben. Im folgenden wird eine derartige explizite Darstellung für funktionale Spezifikationen zugrunde gelegt. Der Prototyp von FUNPLAN sollte Aufbau und Strukturierung solcher Graphen gemäß des objektorientierten

Modellierparadigmas gestatten.“, S. 110. Das Modell der funktionalen Spezifikation in Form eines Funktionsplangraphen ist Basis für die Überleitung in die geometrische Formfindung, die nicht automatisch stattfindet. Ein Werkzeug aus zwei Modulen unterstützt die Modellierung des Funktionsplangraphen und die graphische Aufbereitung zur Überleitung: „Durch die grafische Arbeitsweise verfügen in FUNPLAN Funktionsobjekte bereits über eine Position auf der Zeichenfläche. Diese Positionen sind durch NETGEN unter Maßgabe von Zielfunktionen zu variieren. NETGEN gehört damit in die Klasse der modellvariierenden Entwurfsautomaten (siehe Kapitel 2). Auch wenn hier in einfacher Weise Aspekte der Formfindung berührt werden, erfolgt bestenfalls eine Aufarbeitung des Graphen in einer Art, die den Formfindungsprozeß unterstützt. Es wird einerseits eine plausible Anfangslösung für den abduktiven Suchprozeß gebildet wird. Andererseits wird die Evaluierung einer Kubatur durch die übersichtliche Darstellung des Funktionsgraphen erleichtert.“, S. 132. Der Vollständigkeit halber sei hier der Funktionsumfang der Module zitiert: „Die gewünschte Funktionalität wurde in Form von zwei Programmodulen realisiert... : // FUNPLAN-Wissen •Klasseneditor zum Aufbau einer taxonomischen Wissensbasis •Gewährleisten der Plausibilität, wie sie aus der mengentheoretischen Betrachtung für hierarchische Klassensysteme folgt // FUNPLAN-Projekte •Instanzeditoren für Planungsobjekte und Plausibilitätstest (formalisierte und informale Attribute und Relationen) •Grafischer Editor für Funktionsplangraphen (Topologie und relevante geometr. Eigenschaften) •Navigation in komplex aufgebauten Funktionsgraphen •Einfache numerische Auswertungen über komplexe aufgebaute Planungsobjekte“, tabellarischer Text von S. 111. In dem Zusammenhang hat das System die Aufgabe der Integration von Werkzeugen: „PREPLAN ist ein Konzept zur Strukturierung eines Sets von Tools zur Unterstützung des architektonischen Entwurfs insbesondere in frühen Phasen. ... Das System will den Nutzer bei der systematischen Erfassung seiner Entwurfsidee in einem Modell unterstützen sowie dieses Modell soweit als möglich plausibel halten.“, S. 105. Diese Anforderung wird auch an BIM-Werkzeuge gestellt, wobei in Steinmanns System die frühe Entwurfsphase unterstützt wird. Im Fazit geht Steinmann auch auf eine Grenze seines Modellierungsansatzes ein: „Eine algorithmische und damit durch Computer unterstützbare Evaluierung bzw. Generierung von Bauwerksmodellen ist in den in der Arbeit behandelten frühen Phasen nur in reduziertem Umfang möglich. In diesem Prozeß rückt die Strukturierung und Verwahrung von Informationen sowie deren gezieltes Retrieval in den Mittelpunkt des Interesses.“, S. 173.

Diese Grenze versucht die hier vorgestellte Modellierungsmethode zu überschreiten. Dazu wird ein Metamodell vorgestellt, welches auch die Modellbildung der Gebäudetopologie mit Funktionsangeboten erlaubt. Darüber hinaus wird die Modellbildung der Gebäudenutzung auf Basis von Nutzungsfällen durch ein formales Metamodell unterstützt und das methodische Vorgehen auf Grundlage von Basismethoden des Architekturentwurfs gegründet. Die inkludierte Methode der Simulation unterstützt die Überprüfung des Gebäudemodells hinsichtlich der spezifizierten Nutzungsanforderungen.

Die Arbeit „Semantische Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs“ von [Kraft 2007] stellt ein Modell und eine Werkzeugbasis zur Unterstützung des funktionsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs vor. Kraft ordnet seine Arbeit folgendermaßen ein: „Hierbei wird der Gebäudeentwurf vorwiegend unter dem Aspekt seiner zukünftigen Nutzung betrachtet. Die zu beschreibenden Elemente sind damit, die im Gebäude vorkommenden funktionalen Einheiten, z. B. Räume, Bereiche und Etagen, sowie deren Zusammenhang. Eine Unterstützung des Architekten erfolgt nicht nur durch die werkzeuggestützte Erstellung funktionsorientierter konzeptueller Entwurfspläne sondern zudem durch Prüfung des Entwurfsplans gegen formalisiertes Fachwissen.“, S. 256. Die Arbeit erörtert und entwickelt zum einen eine Repräsentation der Entwurfselemente und zum anderen des Fachwissens. Die Repräsentation der Elemente abstrahiert von der konstruktionsorientierten Darstellung dieser und des Entwurfsplans, und Kraft möchte mit seiner Arbeit eine

„semantische Betrachtung eines Entwurfsplans“ realisieren, S. 8. Die Elemente bezeichnet er als „semantische Objekte“, die wie „Raumtypen, z. B. Flure, Toiletten, Bäder, und die umschließenden Bereichstypen, z. B. Verkehrswege oder Nutzfläche“, S. 8, passend zur Gebäudeklasse dem Architekten für die frühe Phase des konzeptuellen Entwurfs bereitgestellt werden. Es werden Beziehungen angeboten, um den Zusammenhang zwischen den Objekten zu repräsentieren, z. B. Enthalten sein, Zugang, Nähe oder Sicht. Hierbei sind noch keine für die Konstruktion relevanten Angaben erforderlich und gewünscht. Neben den Elementen des Entwurfsplans wird auch Fachwissen über Architektur und Bauen repräsentiert. Als Beispiele führt Kraft Gesetze, Verordnungen, Normen, Handbücher aber auch Erfahrungswissen auf. Anforderungen oder Restriktionen (z. B. aus Richtlinien) werden in einer formalen graphischen Sprache in Regeln repräsentiert und auf Basis von für die Wissensrepräsentation relevanten Domänenwissen und entsprechenden Begriffen formuliert. Basis ist die definierte Fachontologie der Begriffe und die Objekt-Repräsentation der Elemente. Dabei wird dieses Wissen nach Gebäudeklassen differenziert. Es entstehen also zwei Repräsentationen, die Grundlage einer Konsistenzprüfung sind: „Das Ergebnis der konzeptuellen Entwurfsunterstützung ist ein formaler, d. h. durch Software-Werkzeuge automatisiert zu verarbeitender konzeptueller Entwurfsplan. Das Resultat der Wissensformalisierung umfasst das für eine Gebäudeklasse und für die konzeptuelle Entwurfsphase relevante Fachwissen, ebenfalls in formaler Darstellung.“, S. 11. Die Konsistenzprüfung ermittelt Abweichungen des Entwurfs von den Regeln, die Anforderungen und Restriktionen beschreiben. Das Modell dieses Ansatzes basiert auf Graphgrammatiken und ist mittels Progress implementiert. Der Entwurfsplan, der in diesem graphbasierten Modell repräsentiert wird, umfasst die Struktur des Gebäudes, die aus Graphknoten zur Abbildung von Elementen (Räume, Bereiche etc.) und Kanten zwischen den Knoten zur Darstellung der Beziehungen zwischen diesen Elementen besteht. Das vorgestellte Werkzeug ist mit ArchiCAD integriert worden, um das konzeptuelle Modell in graphbasierter Repräsentation zu einem geometrischen Modell auszuarbeiten.

Der von Kraft vorgestellte Ansatz umfasst nicht die Modellierung einer Nutzungsanforderung in Form eines Nutzungsablaufes aus Bewegung und Funktionsnutzung. Er umfasst nicht die Unterstützung bei der Überprüfung, ob diese Nutzungsanforderung durch eine Gebäudetopologie erfüllt wird. Auch wenn Gebäudeentitäten wie Räume oder Bereiche sowie Beziehungen zwischen diesen repräsentiert werden, so ist es keine Repräsentation von Raumübergängen und Funktionsangeboten, die als aktive Elemente in der Nutzungsrepräsentation Basis des in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Modells der Gebäudenutzung sind. Daher ist auch keine Simulation der Gebäudenutzung Bestandteil jenes Ansatzes wie in der hier vorgestellten Modellierungsmethode, die den Fokus auf die Nutzungsorientierung legt. In der Ontologie werden in Krafts Modellierungsansatz Gebäudekonzepte nachgebildet, die die IFC bereits ähnlich definiert, etwa Building-Site, Building, Storey, Area, Room, Section, vergleiche [Kraft 2007], S. 97. Die Verwendung der IFC wird nicht diskutiert, und der Ansatz stellt keine Beziehung zum BIM-Standard IFC her.

Die Überprüfung eines Gebäudemodells auf Erfüllung bestimmter Anforderungen wird in der Disziplin des computergestützten Entwerfens und BIM unter dem Terminus *Model Checking* zusammengefasst. Grundsätzlich wird der Problemkreis erforscht, ein Gebäudemodell so zu spezifizieren, dass die Erfüllung interessierender Eigenschaften durch das Modell überprüft werden kann. Als praktisch relevant wird die Überprüfung eines Gebäudemodells hinsichtlich der Einhaltung von Normen und Richtlinien gesehen, insbesondere im geometrisch-topologischen Bereich, z. B. zur Barrierefreiheit, Brandschutz bzw. Fluchtweganalyse [BIM 2015], Kap. 20, S. 326, 329. Voraussetzung ist die Abbildung der für die Fragestellung und Analyse relevanten Aspekte des Gebäudes in eine mit dem Computer verarbeitbare Repräsentation und die Verfügbarkeit von Prüfungsverfahren, deren Algorithmen auf Basis dieser Repräsentation die ebenso geeignet formal repräsentierten Anforderungen abarbeiten können. Gegenstand dieses Forschungsbereiches ist also die Entwicklung

geeigneter Metamodelle und Methoden zur Prüfung von Modellen hinsichtlich spezifischer Fragestellungen bzw. Anforderungen. In der Vergangenheit wurden spezifische Lösungen entwickelt, die auf Prädikatenlogik oder speziellen Repräsentationsformen und Algorithmen zur automatischen Schlussfolgerung basierten, um spezielle Erfüllbarkeitsfragestellungen automatisch beantworten zu können, wie oben genannt, während neuere Ansätze den IFC-Standard als Gebäudemodellrepräsentationsformalismus zugrunde legen. Die Arbeit von [Eastman et al. 2009] untersucht „rule checking systems that assess building designs according to various criteria.“, die Untersuchung von fünf Systemen wurde aus folgender Motivation durchgeführt: „The development of rule checking systems for building is very young and only limited user experience is presented. The survey lays out a framework for considering research needed for this area to mature.“, S. 1011. Für die Bewertung der betrachteten Systeme wurde die grundsätzliche Struktur für ein „functionally complete rule checking and reporting system“, S. 1013, aus der Untersuchung solcher Systeme der Vergangenheit und Gegenwart abgeleitet und zugrunde gelegt. Diese besteht aus vier Schritten: „(1) rule interpretation and logical structuring of rules for their application; (2) building model preparation, where the necessary information required for checking is prepared; (3) the rule execution phase, which carries out the checking, and (4) the reporting of the checking results.“, S. 1013. Neben den Bewertungen der fünf Systeme ist diese Struktur an erster Stelle interessant für die Einordnung und Abgrenzung der hier vorgestellten Methode. Es wird aufgeführt, dass zur „Rule Interpretation“ Logik-basierende Repräsentationen (Prädikatenlogik erster Ordnung), eine Ontologie der Namen und Eigenschaften (Omniclass, „It is providing the space, process, actors, building objects and other general classes of information.“, S. 1014), oder Implementationsmethoden auf Basis in der verwendeten Programmiersprache codierter Regeln oder Parametertabellen, genutzt werden. Die Programmiersprache sei durch ihre Ausdruckskraft getrieben, und in erster Linie an der Prädikatenlogik oder der Domäne orientiert. Eine spezielle Sprache für Model Checking ist den Autoren nicht bekannt. Die „Building model preparation“, S. 1014, im zweiten Schritt erfordert die Extraktion und spezielle Darstellung von für die Prüfung relevanten Informationen des Gebäudemodells, also die Bildung geeigneter „Model views“, S. 1014, oder die Erzeugung neuer spezifischer Modelle, z. B. ein Graph für Pfade im Gebäude, um Barrierefreiheit bzw. Erreichbarkeiten zu prüfen. Es werden weitere Vorbereitungsmöglichkeiten aufgezählt, die aber Themenbereiche wie Leistungswerte (Energieeffizienz) oder geometrische Aspekte betreffen und in dem hier vorgestellten Ansatz nicht betrachtet werden. Der dritte Schritt der „Rule execution“, S. 1015, besteht aus der syntaktischen Vorprüfung des Modells im Zusammenhang mit den zu prüfenden Regeln, d. h., ob z. B. die verwendeten Begriffe auf einem gemeinsamen Vokabular oder einer Ontologie basieren. Weiter wird die Abarbeitung der Regeln koordiniert, und insbesondere wird die Vollständigkeit und die Konsistenz der Modellversionen beachtet. Da dies in einem iterativen Entwurfsprozess des Gebäudes erfolgt, stelle gerade dies eine besondere Herausforderung dar, so dass die Autoren zu folgender Einschätzung kommen: „Because of incremental implementation and rollout, it is anticipated that code reviews will be a mixture of automated and manual checking for many years.“, S. 1015. Der letzte Schritt beschreibt das „Rule check reporting“, S. 1015. Für die Analyse einer Regelverletzung ist es sehr hilfreich, wenn auf die Regel und die geometrische Position im Gebäudemodell verwiesen wird. Eine reine Benennung des Gebäudeelements oder Raums kann dann nicht präzise genug sein, wenn — wie die Autoren es als Beispiel anführen — „the framing conditions on some corner in the middle of the building may not satisfy some rule.“, S. 1015, also der Objektname geometrisch nicht hinreichend ist, unmittelbar die Problemsituation zu erfassen, was der graphisch geprägten Arbeitsweise des Architekten entgegenkommt. Aus den bewerteten fünf Systemen haben folgende Aspekte eine Ähnlichkeit zu der hier vorgestellten Modellierungsmethode. Das Projekt „Design check by cooperative research centre for construction innovation in the Australia“, S. 1023 f.,¹⁸ verwendet eine Graphenrepräsentation als Sicht auf das Gebäudemodell

18 Implementation des ABCB Systems durch Australian Building Codes Board (ABCB).

zur Prüfung von Erreichbarkeitsregeln: „A graph was developed for inferring adjacent accessible spaces for accessibility checking.“, S. 1024. Das Projekt „General services administration design rule checking“, S. 1027 ff., der General Services Administration, United States, verwendet im System *Design Assessment Tool* (DAT) einen Graphen zur Repräsentation der Topologie des Gebäudes, also der Verbindungen zwischen Räumen, und einen metrischen Graphen zur Repräsentation von Distanzen. Der Topologie-Graph ist die spezielle Sicht auf das Gebäudemodell, um Durchlaufpfade bei der Auswertung von Umlaufregeln zu prüfen. Der Metrik-Graph wird genutzt, um Weglängen im Gebäude zu prüfen und darzustellen: „Two types of graph are defined: (1) a topological graph represents connections between spatial elements This graph was used to check routing paths defined in parameterized circulation rules. (2) The metric graph represents distances reflecting human movement paths within a space This graph is used to check moving distance between two spaces and to visualize circulation analysis results“, S. 1028.

Diese Beispiele und auch der oben vorgestellte Ansatz von [Kraft 2007] zeigen, dass die Verwendung von Graphen eine geeignete Repräsentation für interessierende Sichten auf ein Gebäudemodell sind. Insbesondere die Sicht auf die Topologie des Gebäudes wird auch in dem hier vorgestellten Metamodell zugrunde gelegt. In [Eastman et al. 2009] und [BIM 2015] wird die Sicht vertreten, dass Model Checking eine zunehmend wichtige Rolle im Entwurfsprozess einnehmen wird und die Entwicklung der Modelle und Verfahren noch einige Fortschritte erfordert: „So sind schon heute bereits grundlegende automatisierte Überprüfungen vorwiegend im geometrisch-topologischen Bereich wie beispielsweise dem Brandschutz und der Fluchtweganalyse möglich. Aus diesem Grund handelt es sich um ein äußerst aktuelles Forschungsthema, in welchem es noch viele Fragestellungen zu lösen gilt. Aktuelle Forschungsansätze konzentrieren sich vermehrt auf einen ganzheitlichen Lösungsansatz, der vor allem die Beteiligung des Anwenders bei dem Übersetzungsprozess und der Durchführung des Prozesses vermehrt in den Fokus rückt.“ [BIM 2015], S. 329. Die in dieser Arbeit vorgestellte Modellierungsmethode kann Model Checking zugerechnet werden. Gegenstand ist die Modellierung nicht eines speziellen Themas wie Fluchtweganalyse, sondern die Möglichkeit der Modellierung von Nutzungsfällen im Allgemeinen und die Überprüfung der Gebäudetopologie hinsichtlich der Nutzbarkeit entsprechend der spezifizierten Nutzungsfälle.

Das gegenwärtige Projekt METIS mit dem Titel „Knowledge-based search and query methods for the development of semantic information models for use in early design phases“ [METIS-DFKI 2017] bzw. „Wissensbasierte Such- und Abfragemethoden für die Erschließung von Informationen in semantischen Modellen (BIM) für die Recherche in frühen Entwurfsphasen“ [METIS-TUM 2017] des DFKI¹⁹ und der TUM²⁰ zielt auf die Unterstützung der Entwurfstätigkeit in der Konzeptphase, und hier bei der Herstellung der Zugänglichkeit zu bereits Gebautem oder anderen geplanten oder modellierten Gebäuden. Unterstützt werden soll insbesondere die Methode des Fall-basierten Schließens, die in 4.1 auf Basis [Schmitt 1993] auch für die hier vorliegende Methode betrachtet wird. Im Vorgriff auf die dort beschriebene Methode und Einordnung des in dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes in 5.3.2 hat das METIS-Projekt den abweichenden Schwerpunkt in der Schaffung einer Repräsentationsform von Gebäudemodellen, die eine Recherche für den Zugriff auf eine Wissensbasis aus Gebäudemodellen erlaubt. Dabei interessieren Referenzen, um den eigenen Entwurf anzuregen. Zur Lösung werden u. a. „Methoden und Modelle zum Auffinden formaler Strukturen“ und eine „Beschreibungs- und Anfragesprache für räumliche Konfigurationen“ [METIS-DFKI 2017] erarbeitet. Die hier vorgestellte Methode verfolgt nicht primär einen Lösungsbeitrag zu den Problemfeldern „Rückgriff auf bewährte Lösungen“ oder „Überprüfung wiederverwendbarer Lösungen“ des Fall-basierten Schließens nach Schmitt.

19 Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz, <https://www.dfki.de/web/forschung/sds>

20 Technische Universität München, Lehrstuhl für Architekturinformatik, <https://www.ar.tum.de>

Abschließend sei in Bezug auf Werkzeuge für BIM aus [BIM 2015] zum Thema BIM-Werkzeuge in frühen Entwurfsphasen zitiert, dass „gerade für die Vorentwurfs- und Entwurfsphasen noch nicht ausreichend intuitive BIM-basierte Werkzeuge zur Verfügung stehen.“, S. 267. Die dort genannte Definition „Unter BIM-Werkzeugen sind parametrische, raum- und bauteilorientierte Softwarewerkzeuge zu verstehen sowie vielfältige Auswertungs- und Simulationswerkzeuge, die auf einem semantischen Bauwerksmodell operieren.“ erlaubt die Einordnung der hier vorgestellten Modellierungsmethode mit ihrem Realisierungsansatz als Grundlage eines BIM-Werkzeugs.

3.5 Zusammenfassung und Überleitung zur Modellierungsmethode

In 3 werden zunächst die Begriffe des konzeptuellen Gebäudeentwurfs und der Nutzungsorientierung auf der Basis einer historischen Einordnung in 3.1 anhand folgender Fragen eingeführt:

1. Worauf fokussiert die Modellierungsmethode den Entwurf?
2. Was bedeutet Konzept im Zusammenhang mit dem Entwurf in dieser Arbeit?

Zusammenfassend richtet die Modellierungsmethode den Gebäudeentwurf auf die Gebäudenutzung und damit zusammenhängende Modellierungsgegenstände. Diese werden im Folgenden in 4.2 herausgearbeitet. Es handelt sich um Konzepte, die nicht den konstruktiven und gestalterischen Entwurf im Kern betreffen. Zwar gibt es Anknüpfungspunkte, die die Nutzung tangieren, etwa Raumgrößen oder Raumübergänge, und Abbildungsfragen zu BIM, die in der weiteren Arbeit behandelt werden. Die zweite Fragestellung lässt sich ebenso beantworten durch Bezug auf Konzepte einzelner Etappen der dargestellten Historie. Jene Konzepte haben mehr oder weniger begriffliche Nähe zu den in dieser Arbeit eingeführten *Begriffen*, die den Gesamtbegriff des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs bestimmen. Dies sind die *Modellierungsgegenstände* und die in 4.4 begründet hergeleitete *Repräsentationsform*, die als graphische Form, ähnlich wie Bubble Diagrams und Functional Diagrams, den Zusammenhang zwischen Raum und Funktion darstellt. Der Gedanke der Spezifikation von Bewegungsabläufen findet sich wieder in den hier vorgestellten Begriffen des Nutzungsfalls und der Gebäudenutzung als Basis der Methode der Simulation. Und dies sind schließlich Konzepte, die die *Methode*, das *Vorgehen* und die *Verwendung* betreffen. Diese Konzepte unterstützen den konzeptuellen Gebäudeentwurf. Ihre Ausprägung wird in 5.3 hergeleitet. Es handelt sich sämtlich um *Konzepte*, welche die Mittel des Entwurfs sind; keine Konstruktionslehre und keine künstlerisch-gestalterischen Mittel, auf denen diese Methode zum Entwurf basiert. Daher wird von *konzeptuellem Entwurf* gesprochen.

Des Weiteren wird in dieser Arbeit die *Nutzungsorientierung* in 3.2 definiert. Die *Nutzung eines Gebäudes* beschreibt das Nutzungsangebot in Form von *Bewegungs- und Funktionsnutzungsangebot* eines Gebäudes. Die *Funktionsnutzung* kann in unterschiedlichen Nutzungsszenarien erfolgen. Das Gebäude wird reduziert auf die für die Beschreibung der Nutzung relevante *Topologie* aus Räumen und Raumübergängen mit Verankerung von Funktionsangeboten an der abstrahierten Entität Raum. Der topologische Zusammenhang zwischen Räumen und Raumübergängen ist Grundlage des *Bewegungsangebotes* des Gebäudes. Auf den Zusammenhang zwischen dieser konzeptuellen Sicht und Begriffen aus der Bauentwurfslehre geht 3.3 genauer ein. Die Anforderung der Nutzung wird durch *Nutzungsfälle* spezifiziert. Die *Gebäudenutzung* beschreibt die Verbindung von Bewegungsanforderung und -angebot sowie Funktionsnutzungsanforderung und Funktionsangebot. Auch die Modellierungsgegenstände im Kontext der Nutzungsorientierung werden in 4.2 definiert.

Die Beschreibung des aktuellen Stands der Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs dient als Referenz des Status quo im Hinblick auf die Beschreibung der Neuartigkeit und Abgrenzung des hier vorgestellten Ansatzes in 4.5.

4 Modellierungsmethode

„His statement — “the shapes of mathematics are abstract, of course, and the shapes of architecture concrete and human. But that difference is inessential”⁵⁷ — turns out to be erroneous. The diagram as an instrument of design thinking structures problems and generates strategies for their solution, and not for the physical expression — that is, the architectural form — of the solution.“²¹

Die hier vorgestellte Modellierungsmethode zur Unterstützung des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs kann auf unterschiedliche Weisen entwickelt werden. An dieser Stelle wird keine erkenntnistheoretische Erörterung vorgenommen, weil diese nicht zielführend für das Ergebnis dieser Arbeit wäre. Es wird aber zumindest das Bewusstsein dafür dokumentiert, dass für das hier gewählte Vorgehen Vorteile bestehen und Nachteile durch besondere Schritte reduziert werden sollen. Diese Schritte schlagen sich in der Struktur dieses Kapitels nieder, wie im Folgenden erläutert. Es gibt einerseits die Möglichkeit, eine Methode vollständig neu zu entwerfen und auszugestalten. Andererseits ist es im Sinne bereits gewonnen Wissens sinnvoll, vorhandene Methoden auf ihre mögliche Verwendung durch Anwendung, Adaption oder Erweiterung zu prüfen.

Hier wird letzteres Vorgehen verfolgt, weil folgende Vorteile gesehen werden: Der Rückgriff auf eine vorhandene methodische Basis partizipiert an den gewonnen Erkenntnissen aus der Nutzung und den Möglichkeiten der Methode. Der Rückgriff unterstützt die weitere Verbreitung einer bewährten Methode und stärkt damit ihre Nutzung und Weiterentwicklung. Durch einen Rückgriff werden bereits getätigte Investitionen in Zeit und andere Aufwände genutzt und aufgewertet. Gleichzeitig entfallen Aufwände in Grundlagenforschung und Entwicklung, die dem eigentlichen Ziel der Arbeit zugute kommen. Es entsteht zudem eine Zeitersparnis.

Folgende Nachteile werden ebenso gesehen und durch Maßnahmen reduziert: Die Wiederverwendung erfordert ein sehr gründliches Herausarbeiten der Problemstellung und insbesondere einen so hohen Grad der Abstraktion, dass es möglich wird, anwendungsferne methodische Ansätze, Verfahren oder Modellierungsansätze zu erkennen, Anknüpfungspunkte zu finden und ggf. Adaptionmöglichkeiten auszuschöpfen. Der Rückgriff setzt die Bereitschaft und Fähigkeit voraus, außerhalb der ursprünglichen Forschungsdisziplin — hier der Architektur — Ansätze zu suchen und zu verstehen.

Die Verwendung — also Anwendung, Adaption oder Erweiterung — eines bestehenden Ansatzes erfordert interdisziplinäre Kreativität, um den vorhandenen Ansatz für die Problemstellung und ihre Anforderungen verwenden zu können.

21 [Stapenhorst 2016], S. 121–123. Das Zitat steht im Zusammenhang mit den Ausführungen von C. Stapenhorst zu der Bedeutung des Diagramms für die Organisation von Information und die Vermittlung von Ideen im Entwurf. Zu ⁵⁷: C. Stapenhorst zitiert: C. Alexander, *Notes on the Synthesis of Form*, 134. Die im Folgenden betrachteten Modellierungskonzepte und auch die schließlich gewählte Modellierungsbasis fußen auf Diagrammen mit Grundlagen in der Informatik und somit Mathematik. Die Auswahl orientiert sich hierbei an der Fähigkeit auch der Diagramme, die Modellierungsgegenstände des nutzungsorientierten Gebäudeentwurfs repräsentieren zu können.

Das hier gewählte Vorgehen eines Rückgriffs auf mögliche etablierte Modellierungsansätze oder -methoden wird daher durch folgende Schritte zielführend unterstützt:

1. Ableitung der Anforderungen aus der Problemstellung in 4.3.1
2. Methodischer Bezug als Grundlage der Methode in 4.1 und berücksichtigt in der Anforderungsanalyse in 4.3.1
3. Vorauswahl an Ansätzen und Bewertung in 4.3.2
4. Auswahl und Vertiefung der Verwendungsmöglichkeit in 4.3.3
5. Entwicklung der Modellierungsmethode auf dieser Basis in Kapitel 5.

4.1 Einordnung in Basismethoden des Architekturentwurfs

Der Entwurf dieser Modellierungsmethode fußt auf der Verwendung einer vorhandenen methodischen Basis. Neben Anforderungen aus der Problemstellung ist der methodische Bezug zur Domäne des Gebäudeentwurfs eine notwendige Voraussetzung für die Auswahl der methodischen Basis und der aufbauenden Ausarbeitung. Für den nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurf werden Basismethoden ausgewählt, auf die in den Schritten der Ausarbeitung der Modellierungsmethode Bezug genommen wird. Das Werk von [Schmitt 1993] dient als Referenz der Auswahl.

Basis der Modellierungsmethode für den nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurf sind Mittel der Modellbildung und Repräsentation, die den Entwerfer in seiner Modellierungsaufgabe unterstützen. Hierzu führt Schmitt aus, dass die Repräsentation von Architektur und ihren interessierenden Aspekten durch geeignete Repräsentationsformen grundlegend ist, S. 32: „Repräsentation ist die vereinfachte, doch wesentliche Eigenschaften umfassende Darstellung eines Objektes oder Zustandes zum Zweck der Übermittlung und Weiterverarbeitung. Datenrepräsentation ermöglicht die Beschreibung von Problemen und Teilproblemen als Objekte sowie deren Beziehungen untereinander im Computer.“

Bei der Gestaltung der Repräsentation besteht eine hohe Priorität darin, eine Balance zu finden zwischen der hinreichenden Verarbeitbarkeit durch den Computer und der Verständlichkeit und Akzeptanz der Darstellung durch den Menschen: „Es besteht das Dilemma, dass die meisten heute bekannten Repräsentationen für menschliche Problemlösungen optimiert sind. Für den Einsatz in der Maschine sind sie also wegen der verschiedenen Strukturen der Wissensverarbeitung denkbar ungeeignet. ... Vielmehr sind die Besonderheiten der im Computer möglichen Repräsentationen auszunutzen, um Lösungsvorschläge wesentlich schneller und akkurater als der Mensch zu generieren und zu evaluieren. Daneben erlauben es die abstrakten Repräsentationen natürlicher Phänomene, bisher unsichtbare Dinge sichtbar zu machen. Computer gewinnen dadurch die Fähigkeit, dem Menschen neue sinnliche Erlebnisse zu erschließen.“, S. 35 f..

Die folgenden Basismethoden für den computergestützten Architekturentwurf nach [Schmitt 1993] werden als methodische Bezugsgröße dieser Arbeit zugrunde gelegt.

Die Methode *Abstraktion und Modellbildung* basiert auf der Repräsentationsform. Grundlage der Unterstützung der Entwurfsaufgabe mit Hilfe des Computers ist die Modellbildung, die auf einer geeigneten Repräsentationsform basieren muss. Modelle können für unterschiedliche, interessierende Aspekte der Entwurfsaufgabe spezialisiert sein: „Modelle sind Strukturen, die Abstraktionen und Operanden zu einer für Analyse und Manipulation einsetzbaren Einheit zusammenfassen. Durch Modelle können wir Verhalten, Aussehen und verschiedenste Funktionen eines neuen Gebäudes vereinfacht darstellen und manipulieren ...“ [Schmitt 1993], S. 38. Der betrachtete Aspekt grenzt Repräsentationsformen und Modellierungsmittel ein. Weiteres bestimmendes Kriterium ist die

beabsichtigte Nutzung des Modells und die Zielgruppe der Nutzer, die durch das Modell in ihren Überlegungen und Handlungen unterstützt werden wollen, wie Schmitt ausführt: „... und sie Betrachterinnen und Betrachtern vermitteln.“ [Schmitt 1993], S. 38. Der auch für diese Arbeit wichtige Schritt ist die *Abstraktion* als Basis eines geeigneten Modells: „Voraussetzung für das Entstehen eines Modells ist das Vorhandensein einer entsprechenden Abstraktion. In Wissenschaft und Architektur ist Modellbildung notwendig, um mit Abstraktionen umgehen zu können.“ [Schmitt 1993], S. 38. Die Abstraktion fokussiert in dieser Arbeit die Nutzung eines Gebäudes. Dies wird in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels hergeleitet. Zur Verwendung der in dieser Arbeit entwickelten Methode und insbesondere ihrer Modellierungsmittel werden auch einige Konventionen festgelegt. Grundsätzlich folgt diese Arbeit dem folgenden Grundsatz von Schmitt: „Jedes Modell erfordert eine Reihe von Übereinkünften oder Konventionen, um effektiv damit arbeiten zu können. Je höher der Abstraktionsgrad, desto mehr Konventionen sind einzuhalten.“ [Schmitt 1993], S. 38. Das in 5 beschriebene Metamodell der hier vorgestellten Methode definiert den Entwurf der Modellierungsgegenstände durch formale Konventionen der Modellierungsbasis. Daher sind weniger informelle Konventionen erforderlich.

Die Methode *Simulation* ist aufgrund der Anforderung der Nutzung wichtig, da die dynamischen Abläufe entsprechend repräsentiert und untersucht werden sollen. Die Nutzung eines Gebäudes, genauer die Nutzung von Funktionen, die Räume des Gebäudes anbieten, ist verbunden mit der Bewegung des Gebäudenutzers im Gebäude hin zu den Orten der Funktionsangebote. Das impliziert eine Dynamik, die Teil der Nutzung ist. Eine Methode, welche die Nutzung modellhaft repräsentieren und verständlich machen soll, muss diese Dynamik inkludieren. Die hier vorgestellte Modellierungsmethode umfasst daher die Methode der Simulation, die — wie auch Schmitt herausstellt — einerseits die interessierenden Aspekte wirklichkeitsnah darstellen kann, andererseits dem Entwerfer hilft, möglichst frühzeitig Klarheit über die Eignung des Entwurfs zu erzielen, um Entwurfsfehler zu reduzieren, die im Falle einer späteren Erkenntnis zu höheren Korrekturkosten führten: „Die Simulation ist zum einen ein Mittel, ein real bestehendes Objekt oder einen real bestehenden Zustand in seinen interessanten Aspekten möglichst wirklichkeitsnah darzustellen. Sie ist zum anderen eine Methode, ein angestrebtes Objekt oder einen angestrebten Zustand in seinen interessanten Aspekten möglichst so darzustellen, daß er mit dem auszuführenden Projekt übereinstimmt. Deshalb muß das Modell möglichst vollständig sein. Mit Simulationen lassen sich unliebsame Überraschungen vermeiden. Es ist bekannt, dass Fehler in der Planungs-, Konstruktions- und Nutzungsphase mit drastisch unterschiedlichen Korrekturkosten verbunden sind. Die Angaben reichen von Verhältnissen von 1:10:100 bis zu 1:100:1000 (Kosten der Fehlerbehebung in der Planungsphase im Verhältnis zu den Kosten der Fehlerbehebung in der Konstruktionsphase im Verhältnis zu den Kosten der Fehlerbehebung in der Nutzungsphase). Somit liegt der beste Zeitpunkt für die Simulation möglicher Fehler in der Planungsphase.“ [Schmitt 1993], S. 40. In 5 wird die Methode inklusive eines Metamodells für alle im Zusammenhang mit der Gebäudenutzung stehenden Aspekte erläutert und verdeutlicht, dass das Metamodell erlaubt, Gebäudemodelle zu erstellen, die die Aspekte der Gebäudenutzung repräsentieren. Die vorgestellte Methode soll die für den Entwerfer wichtige Herangehensweise der Annäherung an den das Problem lösenden Entwurf unterstützen: „Simulationen dienen auch zur interaktiven Annäherung an einen erwünschten Zustand, ...“ [Schmitt 1993], S. 40. Daher wird es für diese Modellierungsmethode als notwendig erachtet, dass eine Simulation von Nutzungsabläufen in Einzelschritten stattfinden kann.

Die Methode *Top-Down* erscheint für die Nutzungsorientierung wichtig, weil auch die Nutzung zunächst abstrakt formuliert und immer weiter verfeinert wird, bis feinste Nutzungsabläufe in einem Gebäude wichtig werden, weil Abhängigkeiten etwa durch Kombination aus Kooperation und Gebäudetopologie die Nutzungsabläufe entscheidend beeinflussen. Anschauliche Beispiele sind in 2.2

und 6 genannt. Die Vorgehensweise beim Entwurf eines Gebäudemodells erfolgt bei der Top-Down-Methode durch Bildung eines Modells für einen umfassenderen Teil des Gebäudes hinsichtlich der interessierenden Aspekte einer Entwurfsaufgabenstellung, welches dann so zerlegt wird, dass Modelle für Teile des Gebäudes hinsichtlich der Aspekte erstellt werden. Die Zerlegung hat hierarchischen Charakter und endet auf der Detaillierungsebene, die ausreicht, um ein Verständnis für die vollständige Lösung der Entwurfsaufgabenstellung zu erreichen. Schmitt gibt zwei wichtige Hinweise zur Akzeptanz einer Top-Down-Methode, die auch die hier vorgestellte Modellierungsmethode verfolgt; erstens folgender Hinweis zur Vereinfachung der Anwendung der Methode: „Eine Vereinfachung erreicht man, wenn der gesamte Prozeß in eine vorkompilierte Struktur standardisierter Elemente paßt, für die dann lediglich die entsprechenden Parameter zu bestimmen sind.“ [Schmitt 1993], S. 42. Zweitens teilt er die Erfahrung, dass erfahrene Architekten mit der Top-Down-Methode arbeiten: „Sie beginnen mit einer schematischen Skizze des Gesamtprojektes und verfeinern diese dann schrittweise, bis der verlangte Grad an Detaillierung und Vollständigkeit erreicht ist.“ [Schmitt 1993], S. 42. Auch für die Abstraktionsebene dieser Modellierungsmethode mit Modellierungsgegenständen der Nutzung und Gebäudetopologie lässt sich die Top-Down-Methode anwenden.

Die Methode *Bottom-Up* hat ihre Bedeutung u. a. für die Gestaltung von Nutzungsfällen und Ableitung einzelner Teile einer Gebäudetopologie aus diesen. Gemäß der Bottom-Up-Methode erfolgt die Modellbildung ausgehend von Teilen der Aufgabenstellung. Der Entwerfer kreiert Teilmodelle, die hinreichend genau die Lösung für interessierende Aspekte der zugehörigen Teile der Aufgabenstellung beschreiben. Die Teilmodelle werden zusammengefügt bis sie ein hinreichendes Modell einer Gesamtlösung für die gesamte Aufgabenstellung bilden. Schmitt weist darauf hin, dass diese Methode nur dann einsetzbar ist, „wenn das Entwurfsproblem durch rationale Entscheidungen gelöst werden kann.“ [Schmitt 1993], S. 44. Die Modellierungsmethode wird diesen Aspekt verfolgen. Die Bottom-Up-Methode bietet nach Schmitts Einschätzung die Möglichkeit, die Erkundung einer Lösung besser zu unterstützen. Ihren Einsatzschwerpunkt charakterisiert er folgendermaßen: „Damit ist sie prädestiniert für die Exploration neuer Entwurfsideen, für Experimente formaler und inhaltlicher Art.“ [Schmitt 1993], S. 44.

Die Methode *Fallbasiertes Schließen* ist laut Schmitt eine bewährte Methode, auf Erfahrung im Entwurfsprozess zurückzugreifen. Es werden zu einer Aufgabenstellung Referenzen, d. h. ähnliche Aufgabenstellungen mit ihren Lösungen gesucht, die Unterschiede herausgearbeitet und die bewährten Lösungen um dieses Delta angepasst. Schmitt sieht, dass die Anwendung der Methode in einigen Punkten zu unterstützen sei: „Die Hauptprobleme sind: die Vollständigkeit der Fall-Datenbank, Methoden der Auffindung korrekter Fälle und die Anpassung an die neuen Anforderungen sowohl in geometrischer als auch in topologischer Hinsicht.“ [Schmitt 1993], S. 48. Die Suche einer passenden bewährten Lösung ist begleitet von einer Prüfung, „ob die Wahl und die Anpassung des ausgewählten Falles das gewünschte Resultat erbringen.“ [Schmitt 1993], S. 48. Die Referenzen, auf die zurückgegriffen wird, wirken als Vorlage oder Richtlinie für Anregungen und Entscheidungsunterstützung im Entwurf, wie Stapenhorst formuliert: „With respect to the use of architectural references as conceptual instruments, it is crucial to underline that they are generators. ... In this respect, architectural references as conceptual instrument generate and communicate criteria and guidelines, which structure and control the decision-making of the design process. They do not function as models ... that are directly transferred — in their entirety or partially in form of citations — into a project. They are not directly applied as architectural forms, but condition the form's production.“ [Stapenhorst 2016], S. 190–191. Die hier vorgestellte Modellierungsmethode hat nicht in erster Priorität den Anspruch, die zwei Hauptprobleme des Rückgriffs auf bewährte Lösungen oder der Überprüfung wiederverwendbarer Lösungen zu lösen. Wie in 5.3.2 dargestellt, bietet die Methode Lösungsansätze und Unterstützung des Entwerfers.

Das von Schmitt so bezeichnete Instrument *Designfokus oder Logical Zoom* [Schmitt 1993] wird hier unter Methoden eingeordnet. Es beschreibt ein Vorgehen, das der Top-Down-Methode entspricht und zwei Aspekte neben der schrittweisen Verfeinerung der Top-Down-Methode ergänzt: Zum einen die schrittweise Weiterentwicklung des Modells und zum anderen die Betrachtung des Modells hinsichtlich interessierender Aspekte und Eigenschaften des zu entwerfenden Gebäudes mit Blick auf die Aufgabenstellung: „Das Bedürfnis, das Modell eines Gebäudes unter verschiedenen Gesichtspunkten zu betrachten und die Eigenschaften des Objektes nacheinander oder parallel zu studieren, ist ein wichtiges Anliegen für Analyse und Entwurf.“ [Schmitt 1993], S. 78. Auch diese Anforderung aus der Praxis des Entwerfens beeinflusst die Ausgestaltung der vorgestellten Modellierungsmethode.

Zusammenfassend werden folgende Aspekte der genannten Basismethoden in der hier vorgestellten Modellierungsmethode berücksichtigt. Der Bezug der in dieser Arbeit entworfenen Modellierungsmethode zu den genannten Basismethoden wird in den Schritten *Anforderungen an die Modellierungsbasis* in 4.3.1 und *Bewertung ausgewählter Modellierungskonzepte* in 4.3.3 hergestellt und abschließend in *Methode: Einordnung in Basismethoden des Architekturentwurfs* in 5.3.2 bewertet.

Methode	Aspekt
Modellbildung	• Abstraktion und vereinfachte Darstellung für Entwerfer • Konvention
Simulation	• Darstellung der interessierenden Aspekte • Risiko- und Kostenminimierung
Top-Down	• Vereinfachung durch vorkompilierte Struktur • Akzeptanz der Modellierungsmethode
Bottom-Up	• Exploration, unterstützt durch formalen Rahmen
Fallbasiertes Schließen	• Überprüfung wiederverwendbarer Lösung • Rückgriff auf bewährte Lösungen
Designfokus / Logical Zoom	• Schrittweise Entwicklung eines Entwurfsansatzes hinsichtlich eines interessierenden Gesichtspunkts • Betrachtung der Eigenschaften des Gebäudemodells

Tabelle 3: Grundlage für die Einordnung der Modellierungsmethode in Basismethoden des Architekturentwurfs

4.2 Modellierungsgegenstand — Definition

Die Modellbildung beginnt mit der Definition der Gegenstände, die im Zusammenhang mit der Nutzungsorientierung im Gebäudeentwurf stehen. Sie sind die Objekte, die in diesem Ansatz die Domäne des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs beschreiben und in einem Modell abgebildet werden.

4.2.1 Zusammenhang

Die Modellierungsmethode setzt die Definition aller relevanten Modellierungsgegenstände voraus. Diese basieren auf der in 2 beschriebenen Problemstellung und den in 3.1 und 3.2 erläuterten Begriffen des konzeptuellen Gebäudeentwurfs und der Nutzungsorientierung.

Die Modellierungsgegenstände sind Bestandteile von Modellen, die durch Anwendung der hier vorgestellten Modellierungsmethode vom Entwerfer kreiert werden. Sie gliedern sich um das Kernthema des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs.

Folgende Begriffe werden definiert:

- Gebäudetopologie
- Nutzung, Nutzer
- Nutzungsfall
- Gebäudenutzung.

4.2.2 Gebäudetopologie

Der Modellierungsgegenstand der *Gebäudetopologie* ist definiert als bipartiter Graph aus Räumen, Raumübergängen und Beziehungen zwischen je einem Raum und einem Raumübergang. Ein bipartiter Graph ist ein Graph, der aus zwei Knotenarten besteht, wobei Beziehungen nur zwischen jeweils zwei Knoten unterschiedlicher Art bestehen. Die Beziehung ist gerichtet, d. h., es wird unterschieden zwischen einer Beziehung „Raum zu Raumübergang“ und „Raumübergang zu Raum“.

Die Gebäudetopologie wird ergänzt um folgende Modellierungsgegenstände: Ein *Raum* ist charakterisiert durch die Attribute Raumbezeichnung, Raumtypisierung, Raumkapazität und -belegungszahl. Einem Raum können eine oder mehrere *Raumbezeichnungen* und eine oder mehrere *Raumtypisierungen* zugeordnet werden. Hierbei handelt es sich um einen Kurztext, i. d. R. ein Wort oder eine Wortgruppe wie „Raum 1.02“, „Flur A“, „Medical Room“, „Room“. Eine Unterscheidung zwischen Raumbezeichnung und -typisierung ist für die Modellierung nicht relevant. Es wird allerdings eine eindeutige Identifikation verwendet, die für die Definition der Modellierungsgegenstände irrelevant ist. Ein Raum hat eine *Raumkapazität*, die durch eine natürliche Zahl festgelegt wird. Eine *Raumbelegungszahl*, die eine nicht negative ganze Zahl sein kann, ist ebenso einem Raum zugeordnet und wird i. d. R. nur durch die Gebäudenutzung verändert, kann aber auch vorbelegt werden.

Ein *Raumübergang*, auch als *Transition* bezeichnet, ist der Modellierungsgegenstand, der die Verbindung von zwei Räumen repräsentiert. Der Raumübergang hat die Attribute Übergangstyp und Barriereangabe. Einem Raumübergang können ein oder mehrere *Übergangstypen* zugeordnet werden. Der Übergangstyp spezifiziert, welche Bauteiltypen der Übergang repräsentiert. Ein Typ wird dann zusammen mit allen Obertypen einer Begriffshierarchie angegeben. Ein Übergangstyp ist beschrieben durch einen Kurztext, i. d. R. ein Wort oder eine Wortgruppe wie „Tür DIN 18101 Breite 860mm“, „Tür“, „Rolltreppe“. Wird also ein Typ „Haustür“ spezifiziert, dann wird auch „Außentür“ und „Tür“ zugeordnet. Dies ist notwendig, weil die Nutzung eines Raumübergangs in Form einer Tür durchaus auch eine genauer spezifizierte Ausprägung des Begriffs Tür einschließen soll, z. B. soll einem Nutzer, der durch eine „Tür“ ein Haus betreten möchte, dies auch dann möglich sein, wenn er nicht in seinem Nutzungswunsch präzise die „Haustür“ benennt. Ein Raumübergang kann ein oder mehrere *Barriereangaben* haben. Die Barriereangabe spezifiziert, welche Barriereeinschränkungen durch den Raumübergang *unterstützt* werden. Eine Bezeichnung „uneingeschränkt“ besagt z. B., dass der Übergang eine uneingeschränkte Bewegung unterstützt, d. h., Nutzer ohne Einschränkungen in ihrer Bewegung den Übergang nutzen können. Einem Raumübergang, der eine Bewegung für Rollstuhlfahrer erlaubt, muss entsprechend eine Bezeichnung wie „Rollstuhlgeeignet“ zugeordnet werden.

Im Vorgriff auf den Modellierungsgegenstand Nutzung sei hier erwähnt, dass Räumen Funktions-

angebote zugeordnet werden können. Da diese keine topologische Einheit darstellen, werden sie unter Nutzung in 4.2.3 definiert.

4.2.3 Nutzung, Nutzer

Der Modellierungsgegenstand der *Nutzung* ist definiert als Kombination aus Bewegung zwischen Räumen und Funktionsnutzung.

Der Modellierungsgegenstand *Bewegung zwischen Räumen* beschreibt einen Ortswechsel von einem Raum über einen Raumübergang zu einem anderen Raum. Für die Modellierungsmethode wird festgelegt, dass die Bewegung folgende Rahmenbedingungen einhält:

- Eine Bewegung erfolgt ausschließlich von einem Herkunftsraum zu einem Zielraum.
- Die Bewegung geschieht immer über einen Raumübergang.
- Die Bewegung erfolgt in der Richtung entlang der gerichteten Beziehung „Herkunftsraum zu Raumübergang zu Zielraum“.
- Eine Bewegung über einen Raumübergang kann nur erfolgen, wenn der zugeordnete Übergangstyp und die Barriereangaben eine Bewegung zulassen. Die Zulassung wird ermittelt aus der Bewegungsanforderung, die in einem Nutzungsfall spezifiziert ist, und den Übergangstypen bzw. den Barriereangaben des Raumübergangs der Gebäudetopologie.²²
- Eine Bewegung kann nur dann erfolgen, wenn eine Berechtigung positiv geprüft ist. Dieser Modellierungsgegenstand wird im Folgenden erläutert.
- Eine Bewegung innerhalb eines Raumes ist kein Modellierungsgegenstand. Soll dies modelliert werden, ist die Gebäudetopologie entsprechend zu verfeinern, so dass der Raum differenziert wird.

Im Zusammenhang mit dem Raumübergang steht der Modellierungsgegenstand *Berechtigung*. Die Modellierung der Prüfung einer *Berechtigung* der Nutzung eines Raums kann zurückgeführt werden auf die Prüfung der Berechtigung des Zugangs zu diesem Raum. Diese wiederum kann im Modell des Raumübergangs festgelegt werden. Eine Berechtigung kann einzelnen Nutzungsfällen oder Nutzerrollen²³ zugestanden oder entzogen werden, beides sowohl im Rahmen der Gebäudenutzung als auch initial. Eine Berechtigung eines Nutzungsfalls oder einer Rolle gilt als positiv geprüft, wenn der Nutzungsfall bzw. die Rolle als berechtigt für den Raumübergang vermerkt ist.

Der Modellierungsgegenstand *Funktionsnutzung* umfasst die *Gebäude- bzw. Raumfunktionsnutzung mit verschiedenen Nutzungsarten*. Unterschieden werden drei Nutzungsarten.²⁴ Erste Art und Basis ist der Modellierungsgegenstand *Funktion eines Raums*. Einem Raum der Gebäudetopologie können mehrere Funktionen zugeordnet werden. Eine Funktion wird als Kurztext zu einem Raum spezifiziert. Hiermit wird ein *Funktionsangebot* eines Raums definiert, Beispiele: „Schlafen“ in einem Schlafzimmer, „Körperpflege“ in einem Badezimmer, „Untersuchung“, „Behandlung“ in einem Zahnarztbehandlungsraum. Die Nutzung einer Funktion hingegen wird in einem Nutzungsfall angefordert. Die zweite und dritte Nutzungsart modellieren die gemeinsame Nutzung definierter Funktionsangebote. Beide Nutzungsarten haben gemeinsam, dass die gemeinsame Nutzung einer Funktion eines Raums modelliert wird und der Nutzung eine Phase des Eintreffens im Raum vorausgeht. Die zweite Nutzungsart ist der Modellierungsgegenstand *gemeinsame*

²² Zum Nutzungsfall und der erwähnten Zulassungsprüfung erfolgen in 4.2.4 weitere Definitionen.

²³ Die Definition der Nutzerrolle im Zusammenhang mit dem Nutzer erfolgt gleich.

²⁴ Für die hier vorgestellte Modellierungsmethode wurden drei abgrenzbare Arten herausgearbeitet. Die Methode hat keine vordefinierte Beschränkung, so dass das ihr zugrunde liegende Rahmenwerk erweiterbar ist.

Nutzung ("joined Use") und wird als Kombination aus Raum, Funktion und Nutzeranzahl im Nutzungsfall in der Gebäudenutzung definiert, Beispiele: „Besprechung“ in einem Büroraum, „Gemeinsames Essen“ in einem Wohnraum. Die dritte Nutzungsart, der Modellierungsgegenstand *gemeinsames Nutzungsszenario* ("joined Team Use") wird initial in der Gebäudenutzung definiert und legt für jede gewünschte Kombination aus Raum, Funktion und Nutzerrolle Nutzungsszenarien fest, Beispiel: „Behandlung“ in einem Zahnarztbehandlungsraum. Im Nutzungsfall wird die gemeinsame Nutzung zweistufig modelliert: Erstens Eintreffen der Szenarioteilnehmer und zweitens gemeinsame Nutzung.

Der *Nutzer* des Gebäudes bzw. von Räumen und Funktionen, und derjenige, der sich im Gebäude bewegt, ist kein Modellierungsgegenstand dieser Methode, da keine einer Person immanenten Eigenschaften für die Modellierung relevant sind. Nur die *Nutzerrolle* ist für die Auswertung von Berechtigung zum Raumübergang und für die gemeinsamen Nutzungsszenarien notwendig. Die Nutzerrolle wird als Wort oder Kurztext bezeichnet und sollte in eine sinnvolle Systematik passen, z. B. die Rollen einer Organisation oder Nutzerkreise eines Gebäudes.

4.2.4 Nutzungsfall

Der Modellierungsgegenstand *Nutzungsfall* beschreibt als Anforderung den Prozess der Nutzung eines Gebäudes. In der realen Welt existiert ein Nutzer als Akteur der Nutzung, wobei für die Modellbildung der Nutzer als unpersönlicher Repräsentant zu verstehen ist. Somit kann ein Nutzungsfall real aufgefasst werden als Anforderung eines Nutzers. Wie zuvor begründet, ist aber der Nutzer als Bestandteil der Modellbildung dieser Methode nicht erforderlich. Daher wird für diese Methode der Nutzungsfall — und nicht der Nutzer — als relevanter Modellierungsgegenstand verwendet. Ein Nutzungsfall als Anforderung an die Nutzung eines Gebäudes hat zwei Prozesselemente. Erstens kann die Bewegung zwischen Räumen und zweitens die Nutzung der angebotenen Funktionen eines Raums als Anforderung spezifiziert werden. Die Spezifikation einer Bewegung umfasst einen Herkunfts- und einen Zielraum sowie optional eine Angabe zum zulässigen Übergangstyp, z. B. „Tür“ oder „Treppe“ und der erforderlichen Barriereangabe, z. B. „Rollstuhl-geeignet“ oder „uneingeschränkt“. Weitere Ausprägungen dieser beiden Angaben sind in einer Begriffssystematik zu erarbeiten, die nicht Bestandteil der Arbeit ist, weil sie den Ansatz weder fördert noch einschränkt. Der Nutzungsfall hat eine *Nutzungsausprägung*. Diese kann die Bewegung oder die Funktionsnutzung priorisieren oder beide gleich gewichten. Ein Nutzungsfall ist demnach bewegungsorientiert oder funktionsorientiert oder diesbezüglich neutral.

Ein Nutzungsfall ist im Modell Subjekt der Gebäudenutzung und nimmt in dem Sinne die Position des Nutzers mit seinen Anforderungen ein. Daher ist er auch Objekt von Berechtigungsprüfungen für Raumübergänge oder von Teilnahmen an gemeinsamer Nutzung. Zur eindeutigen Behandlung des Nutzungsfalls in diesen Zusammenhängen erhält ein Nutzungsfall eine *Nutzungsfall-identifikation*.

4.2.5 Gebäudenutzung

Ein für diese Methode wichtiger Modellierungsgegenstand ist die *Gebäudenutzung*, basierend auf dem Zusammenhang von Nutzungsfall und Gebäudetopologie. Der Modellierungsgegenstand wird festgelegt als die *Verbindung von der Bewegung zwischen Räumen und dem Raumübergang sowie von Raumfunktionsnutzungsanforderung und Raumfunktionsangebot*. Dieser Zusammenhang kann durch zwei Aspekte der Gebäudenutzung modelliert werden: Durch eine angleichende Verbindung von Bewegung zwischen zwei Räumen über die im Nutzungsfall spezifizierte Raumübergangsanforderung und dem in der Gebäudetopologie definierten Raumübergang ist der erste Aspekt

modellierbar, durch eine Verbindung einer Anforderung der Nutzung einer Raumfunktion aus einem Nutzungsfall und eines Angebots von Raumfunktionen der Gebäudetopologie der zweite Aspekt.

4.3 Bestimmung der methodischen Modellierungsbasis

Der wichtigste grundsätzliche Schritt dieser Arbeit ist die Findung einer Basis der Modellierungsmethode — das Fundament des gesamten methodischen Gebäudes. Gemeint ist hier die Basis der Modellbildung oder — synonym verwendet — Modellierung, wobei ein Modell das Objekt und Ergebnis einer methodisch basierten Modellierung ist. Die diesbezügliche methodische Basis wird in 4.1 begründet.

Die Bestimmung dieser Basis der Modellierung geht von einer Anforderungsanalyse aus, bewertet eine Auswahl an Modellierungskonzepten, untersucht die Anwendbarkeit einer als passend bewerteten Modellierungsbasis näher, um diese als Basis der in Kapitel 5 vorgestellten Modellierung und Ausarbeitung der Methode anzuwenden.

4.3.1 Anforderungen an die Modellierungsbasis

Die in dieser Arbeit entworfene Modellierungsmethode ist ausgerichtet an einer Reihe von Anforderungen aus Sicht des Gebäudeentwurfs, aus methodischer Sicht und hinsichtlich der zuvor eingeführten Modellierungsgegenstände.

Naheliegender Weise sollen *Anforderungen zur Unterstützung des Gebäudeentwurfs* erfüllt werden. Die in 2.3 im Zusammenhang mit der Zielformulierung aufgestellten allgemeinen Anforderungen sollen an dieser Stelle nicht repetiert werden und gehen in die nachfolgende detaillierte Anforderungsliste ein. Die Anforderungen dienen der Gestaltung einer Methode, und daher ist ein fundierter *methodischer Bezug* wichtig. Alle abgeleiteten Anforderungen werden den in 4.1 ausgewählten Basismethoden des Architekturentwurfs zugeordnet. Dies hilft, die Modellierungsmethode hinsichtlich etablierter und bewährter Methoden auszuprägen und so den Gedanken der Wiederverwendung bewährten methodischen Wissens zu bewahren. Die in 4.2 definierten *Modellierungsgegenstände* bestimmen den konkreten Inhalt der Anforderungen, die zur konkreten Ausgestaltung der Modellierungsbasis und insbesondere ihrer Modellierungssprache bzw. -mittel führen.

Die Anforderungen werden im Zusammenhang gesehen und berücksichtigt. Am Beispiel des Modellierungsgegenstandes des Nutzungsfalls aus 4.2 sei dies hier kurz dargestellt. Eine allgemeine Anforderung aus 2.3 ist die Orientierung an der graphisch geprägten Arbeitsweise des Architekten. Die Modellierung eines Gebäudes anhand eines Nutzungsfalls mit dem Ziel, dass dieser in dem Gebäude möglich ist, wird nach den in 4.1 für relevant erklärten Basismethoden Designfokus und Simulation erfolgen. Ergebnis der Anforderungsanalyse ist die Forderung nach einer graphischen Repräsentation von Nutzungsfällen ähnlich Workflow-Diagrammen, weil diese allen genannten Sichtweisen gerecht wird.

Die folgende Darstellung der Anforderungen ist strukturiert nach dem Modellierungsgegenstand, der Auflistung zugehöriger Anforderungen und in Bezug gesetzt zu relevanten Basismethoden. Im Detail werden in folgender Tabelle 4 die Anforderungen an die Modellierungsbasis der in dieser Arbeit entwickelten Methode aus den drei genannten Sichtweisen formuliert. Alle Anforderung zielen darauf, dass neben der Modellbildung Aspekte der Bottom-Up- und Top-Down-Methoden aus 4.1 einbezogen werden, nämlich, dass diese Methode einerseits durch eine vorkompilierte Struktur eine Vereinfachung bei der Modellbildung bietet und andererseits bottom-up die Exploration durch einen formalen Rahmen unterstützt. Die weiteren Basismethoden werden spezifisch durch die jeweiligen Anforderungen unterstützt.

Modellierungsgegenstand	Anforderung	Methodischer Bezug
G E B Ä U D E T O P O L O G I E		
Gebäudetopologie	• Die Gebäudetopologie soll als Lagebeziehung der Räume und Raumübergänge beschrieben werden können. • Ein Raumübergang verbindet dabei zwei Räume.	Designfokus, Fallbasiertes Schließen
Raumbezeichnungen und Raumtypisierung	• Jeder Raum soll im Modell eindeutig bezeichnet werden können (Raumidentifikation). • Zu jedem Raum sollen eine Bezeichnung und ggf. Oberbegriffe oder Synonyme im Modell angegeben werden können.	Fallbasiertes Schließen
Raumkapazität und -belegungszahl	Zu jedem Raum soll die Zuordnung • einer veränderlichen Kapazität und • einer veränderlichen Belegung modelliert werden können.	Designfokus, Simulation
Raumübergänge (Transitionen) und damit Verbindung von Räumen	Raumübergänge (Transitionen) sollen in folgenden Aspekten modellierbar sein: • Jeder Übergang soll genau zwei Räume verbinden. • Jeder Übergang soll eindeutig bezeichnet werden können (Transitionsidentifikation). • Die Nutzung eines Raumübergangs hängt von einer Berechtigung ab. • Eine graphische Repräsentation soll möglich sein: Räume und Raumübergänge sollen verbunden werden durch gerichtete Kanten. Eine solche Relation modelliert die Richtung des Übergangs in erster Linie als Vorgabe für eine Bewegungsrichtung von einem Raum zu einem anderen via des Übergangs.	Designfokus, Fallbasiertes Schließen, Simulation
• Übergangstypen	Zu jedem Übergang soll eine Typisierung modelliert werden können.	Designfokus, Simulation
• Barriereangaben	Die Zuordnung einer Barrierebezeichnung soll modellierbar sein.	Designfokus, Simulation
N U T Z U N G		
Bewegung zwischen Räumen	Die Nutzung von Räumen ist verbunden mit der Möglichkeit der Bewegung zwischen diesen. Eine Bewegung zwischen jeweils genau zwei Räumen soll modelliert werden können.	Designfokus, Fallbasiertes Schließen, Simulation
Gebäude- bzw. Raumfunktionsnutzung mit verschiedenen Nutzungsarten	• Die Nutzung des Gebäudes bzw. der Räume soll modellierbar sein als Nutzung einer vom Raum angebotenen Funktion. • Jede Funktion soll eine Bezeichnung haben. Es ist möglich, dass verschiedene Räume gleich bezeichnete Funktionen haben. • Einem Raum dürfen mehrere Funktionen zugeordnet sein. • Es soll die Nutzung durch einen oder mehrere Teilnehmer modelliert werden können. • Im Falle mehrerer Teilnehmer sollen zwei Arten modelliert werden können: Gemeinsame Nutzung und gemeinsame Nutzungsszenarien.	Designfokus, Fallbasiertes Schließen, Simulation
Zugangsberechtigungen	• Für die Nutzung eines Raums bzw. seiner angebotenen Funktionen soll die Berechtigung hierzu modelliert werden können. • Die Prüfung einer Berechtigung der Nutzung eines Raums	Designfokus, Simulation

Modellierungsgegenstand	Anforderung	Methodischer Bezug
	soll auf die Prüfung der Berechtigung der Bewegung entlang eines Raumübergangs zurückgeführt werden. • Dies soll durch die Modellierung der Berechtigung zu einem zugehörigen Raumübergang erfolgen.	
N U T Z E R		
Nutzerrollen	• Der Nutzer tritt im Modell nur partiell auf. Er ist reduziert auf die notwendigen Aspekte wie unter 4.2.3 erklärt. • Im Zusammenhang mit der Modellierung der Zugangsberechtigung zu Räumen sollen Nutzerrollen durch Bezeichnungen modelliert werden können.	Designfokus
N U T Z U N G S F A L L		
Nutzungsfall, Eigner ist Nutzer	Ein Nutzungsfall soll folgende Aspekte modellieren: • Bewegung im Gebäude zwischen Räumen • Folge von Räumen und Raumübergängen • Spezifikation der Nutzung von Funktionen eines Raums • Ein Nutzungsfall ist bewegungsorientiert oder funktionsorientiert oder diesbezüglich neutral. • Graphische Repräsentation: Räume und Raumübergänge sollen verbunden werden durch gerichtete Kanten. Eine solche Relation modelliert die Richtung der Bewegung von einem Raum zu einem anderen via des Übergangs.	Designfokus, Fallbasiertes Schließen, Simulation
Nutzungsfallidentifikation	Jeder Nutzungsfall soll eindeutig bezeichnet werden können.	
Ablauf der Nutzung von Funktionen	Die sich über das Gebäude erstreckende Nutzung von Funktionen, die in mehreren Räumen angeboten werden, kann einer vorgegebenen Reihenfolge unterliegen. Diese Reihenfolge soll im Nutzungsfall modelliert werden können. Folgende Anforderungen bestehen im Detail: • Die Festlegung einer Abfolge von Funktionsnutzungen soll durch Statuszustände der Erledigung modelliert werden können. • Eine mögliche Abhängigkeit der Bewegung zwischen Räumen von der Erledigung von Raum- oder Funktionsnutzungen soll modelliert werden können. • Diese Festlegungen sollen graphisch modelliert werden können.	Designfokus, Simulation
G E B Ä U D E N U T Z U N G		
Verbindung von der Bewegung zwischen Räumen und dem Raumübergang sowie von Raumfunktionsnutzungsanforderung und Raumfunktionsangebot	Eine essentielle Anforderung betrifft die Zusammenführung von Gebäudetopologie und Nutzungsfall. • Gebäudetopologie und Nutzungsfall sollen in zwei getrennten Modellen spezifiziert werden können. Zur Prüfung, ob eine Gebäudetopologie der Anforderung eines Nutzungsfalls (oder mehrerer Nutzungsfälle) gerecht wird, ist eine Zusammenführung der beiden (oder mehrerer) Modelle und Simulation notwendig. • Die Bewegung zwischen Räumen und der Raumübergang, entlang dessen die Bewegung erfolgen kann, sollen im Modell in Beziehung gesetzt werden können. • Die Verbindung zwischen einer Anforderung nach einer zu nutzenden Funktion und einem Raumfunktionsangebot soll modellierbar sein.	Simulation

Modellierungsgegenstand	Anforderung	Methodischer Bezug
E I N O R D N U N G U N D A N K N Ü P F U N G S P U N K T E A N B I M		
Gebäude bzw. alle	Neben Anforderungen bezüglich der Modellierung der Gegenstände besteht eine Anforderung an das Modellierungsergebnis, an das Modell. Diese Anforderung unterstützt die Verbindung dieser Modellierungsmethode mit BIM und bildet die Basis für einen Realisierungsansatz. • Für ein aus dieser Methode gebildetes Modell soll die Möglichkeit der Zuordnung von Modellelementen zu Artefakten des Architekturentwurfs, insbesondere einem 3D-Gebäudemodell, gegeben sein. • Auf dieser Basis soll die Abbildung des Gebäudetopologiemodells in ein BIM-Modell und umgekehrt unterstützt werden. • So soll z. B. die Einbindung von räumlichen Aspekten in die Modellierung der Gebäudetopologie unterstützt werden und umgekehrt sollen aus einem Modell der hier vorgestellten Methode Parameter auf ein BIM-Gebäudemodell abbildbar sein.	Modellbildung

Tabelle 4: Anforderungen an die Modellierungsmethode

4.3.2 Auswahl an Modellierungskonzepten

Auf der Suche nach einem Modellierungskonzept als Grundlage der hier vorgestellten Modellierungsmethode wird die Unified Modeling Language (UML) in Betracht gezogen. Des Weiteren werden Petrinetze in Erwägung gezogen, deren Modellierungsmethode auch die Ausprägung von Elementen der UML beeinflusst hat. Sie aber als Teil der UML zu bezeichnen, ist nicht richtig, auch wenn sie einen eingeschränkteren Zweck, nämlich schwerpunktmäßig die Modellierung nebenläufiger Systeme und ihrer Eigenschaften haben.

Folgende Gründe sprechen für die Wahl der UML. Die UML ist in den vergangenen rund 20 Jahren aus Modellierungssprachen mit verschiedenen Einsatzdomänen und Modellierungsperspektiven evolutionär entwickelt worden, wobei diese verschiedenen Ansätze zusammengeführt worden sind, wie drei Ihrer wesentlichen Schöpfer in [BRJ 2006] einleitend beschreiben. Auf dieser Quelle basieren auch die folgenden Ausführungen, die aber keine Repetition sind, sondern allein auf den Zweck dieser Arbeit fokussiert sind.

Die UML hat Ihren Schwerpunkt in der Modellierung von komplexen IT-Systemen für beliebige Branchen und Anwendungsfälle. Sie ist in dieser Einsatzdomäne weltweit verbreitet. Der Autor ist aber in Kenntnis der UML in diesem Zusammenhang der Überzeugung, dass einige Modellierungsmittel für die Domäne dieser Arbeit als Referenzmodellierungsmittel herangezogen werden können, um den Charakter der Modellierungsaufgabe und der Modellierungsgegenstände des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs besser einordnen zu können; dies aus dem Grund, weil sich die UML für komplexe Modellierungsaufgaben mit Bezug zu den Anwendungsfällen der modellierten Systeme bewährt hat.

Die UML in der Version 2 bietet reichhaltige Modellierungsmittel, die entstanden sind aus der Zusammenführung verschiedener Modellierungssprachen. Die Modellierungsmittel werden definiert über Syntax, Semantik und Konventionen, die die Nutzung in der Modellierung beschreiben. Die UML ist eine graphische Modellierungssprache, ihre Syntax beschreibt Diagramme, und die

Semantik legt die Bedeutung und die Zusammenhänge der Diagrammbestandteile fest. Die Mittel können eingeordnet werden in Mittel, die Strukturen beschreiben, und in solche, die Verhalten beschreiben.

Im Folgenden werden die Diagrammtypen der UML 2 betrachtet, die keine rein IT-technische Ausrichtung haben und somit Kandidaten einer Modellierungsbasis sind. Die folgende Tabelle 5 listet die betrachteten Diagrammtypen auf. Begonnen wird mit Diagrammen zur Modellierung von Strukturen, also statischen Aspekten der zu modellierenden Domäne, gefolgt von Diagrammen zur Beschreibung von Verhalten, also dynamischen Aspekten der Domäne. Ziel der Erörterung ist die Vorselektion und Begründung mit Bezug auf die hier bearbeitete Domäne, wie in 4.2 durch die Modellierungsgegenstände definiert. Die Begründung besteht aus einem Abgleich zwischen der Beschreibung des Diagrammtyps im Hinblick auf den Einsatzzweck und den Anforderungen der Modellierungsgegenstände aus 4.3.1 mit der Einschätzung, ob Zweck und Anforderungen bzw. Modellierungsgegenstände zueinander passen.

Diagrammtyp	Ausschluss / Einschluss	Einschluss- oder Ausschlussbewertung
<i>Strukturdiagramme</i>		
Klassendiagramm	A	Das Klassendiagramm erlaubt die objektorientierte Darstellung von Klassen als Sammelentität von Objekten gleicher Struktur und ihren Beziehungen wie Generalisierung, Assoziation und Aggregation. Da eine Modellierung des Gebäudes nicht Bestandteil der Modellierungsmethode ist, sondern nur seiner Topologie, ist eine komplexe statische Modellbildung nicht erforderlich. Würde die Gebäudemodellierung in dieser Arbeit im Vordergrund stehen, wäre eine Modellierung auf Basis der IFC, die auf ausgearbeiteten spezifischen Klassen basiert, im Sinne der Fortschreibung von bewährtem und standardisierten Wissens und Technologie der richtige Ansatz.
Komponentendiagramm	A	Hier gilt das zu Klassendiagrammen Formulierte für eine übergeordnete Aggregationsebene.
Verteilungsdiagramm	A	Das Deploymentdiagramm dient der Spezifikation der Verteilung von Softwarekomponenten auf Rechnerknoten und ist damit kein passendes Modellierungsmittel für die Anforderungen dieser Arbeit.
Objektdiagramm	A	Das Objektdiagramm erlaubt die Darstellung von Klasseninstanzen, also Objekten, und ihren Beziehungen. Die Ausführungen zu Klassendiagrammen gelten auch hier.
Paketdiagramm	A	Pakete sind ein strukturelles Modellierungsmittel der UML. Es gibt keine Anforderung für diese Modellierungsmethode, die auf Basis von Paketmodellierung gelöst werden könnte. Die Ausführungen zu Klassendiagrammen gelten auch hier.
<i>Verhaltensdiagramme</i>		
Aktivitätsdiagramm	A	Ein Aktivitätsdiagramm dient der Modellierung von Abläufen. Im Vordergrund steht die Beschreibung des Steuerungsflusses als eine Abfolge von sequentiellen und auch nebenläufigen Aktivitäten. Während diese zur Modellierung von Raumfunktionen und Bewegungen herangezogen werden können, fehlt im Diagramm die explizite Repräsentationsmöglichkeit für Räume.
Anwendungsfalldiagramm	E	Der in dieser Arbeit verwendete Begriff des Nutzungsfalls legt nahe, die Abbildbarkeit der hier aufgestellten Anforderungen näher zu untersuchen. Der Anwendungsfall der UML ist das Modellierungsmittel für die Beschreibung des Außenverhaltens eines Systems, insbesondere für die Spezifikation von Wechselwirkungen zwischen beteiligten Entitäten bzw. Akteuren.

Diagrammtyp	Ausschluss / Einschluss	Einschluss- oder Ausschlussbewertung
Interaktionsdiagramm	E	Ein Interaktionsdiagramm kann entweder ein Sequenz- oder ein Kommunikationsdiagramm sein, je nach Schwerpunkt der modellierten Sichtweise. Modellierungsgegenstand sind Objekte und ihre Beziehungen, insbesondere ihre Interaktion durch Austausch von Nachrichten. Fasst man Räume und Raumfunktionen als Objekte auf, kann der Raumübergang als Beziehung zwischen Räumen, entlang dessen eine Bewegung stattfinden kann, aufgefasst werden. Ebenso kann die Raumfunktion als angelegte Beziehung zwischen Raum und Funktion verstanden werden.
• Sequenzdiagramm	E	Es gilt das zu Interaktionsdiagrammen Formulierte. Die Modellierung der Nutzungsreihenfolge, wie in den Anforderungen in 4.3.1 zum „Ablauf der Nutzung von Funktionen“ beschrieben, kann die Möglichkeit der Sequenzdiagramme, über das Modellierungsmittel der Lebenslinien eine Reihenfolge der Interaktion zu spezifizieren, adaptieren. Diese Idee soll daher näher untersucht werden.
• Kommunikationsdiagramm	E	Ähnlich einem Sequenzdiagramm dient ein Kommunikationsdiagramm der Modellierung der Interaktion und dem Austausch zwischen Objekten, wobei durch die Darstellung die Lebenslinie in den Hintergrund rückt und die austauschenden Objekte deutlicher werden. Dieses Diagramm rückt die Darstellung der Räume als Objekte und damit die Gebäudetopologie in den Vordergrund.
Zeitverlaufsdiagramm	A	Das Diagramm dient der Modellierung zeitlichen Verhaltens eines Systems. Es werden keine Anforderungen der zeitlichen Dimension gestellt.
Zustandsdiagramm	A	Ein Zustandsdiagramm dient der Repräsentation der Zustände, die ein oftmals reaktives Objekt annehmen kann, und der Ereignisse, die zu Zustandsänderungen führen, sowie von Aktionen, die resultieren. Ein Zustandsdiagramm modelliert den Zustand eines Objektes. Hier könnte die Raumbelugung eines Gebäudes als Zustand verstanden werden. Dieses Modell ist aber durch ein Petrinetz ebenso abbildbar. Es stellt also keine interessante Möglichkeit zur Modellierung der Gebäudetopologie dar.

Tabelle 5: Vorauswahl von Modellierungsmitteln der UML

Petrinetze wurden in den 1960er Jahren von Carl Adam Petri [Petri] entwickelt, um nebenläufige Vorgänge zu beschreiben. Eine Einführung in die Grundlagen und Theorie gibt [Reisig 1986]. Weitergehende Ausführungen werden in 4.4 gegeben. An dieser Stelle werden die Begriffe genannt, die helfen, die folgenden Ausführungen nachzuvollziehen.

Petrinetze sind in verschiedenen Typen entwickelt worden. Relevant für diese Arbeit sind sogenannte Stellen/Transitionen-Netze (S/T-Netze) und Referenznetze, die in 4.4.1 und 4.4.2 näher in den für diese Arbeit relevanten Aspekten beschrieben sind. Alle Petrinetze haben graphische Repräsentationsformen. Ein Petrinetz ist syntaktisch ein bipartiter Graph, bestehend aus zwei Arten von Knoten, die durch gerichtete Kanten verbunden sind. Eine Kante verbindet stets Knoten verschiedener Art. Die Knoten sind im Falle der oben genannten Petrinetztypen Stellen und Transitionen.

Stellen (engl. Places) können mit Marken (engl. Token) belegt werden. Bei S/T-Netzen handelt es sich um unteilbare (atomare) Marken. Im Falle von Referenznetzen können diese Marken Objekte bzw. Referenzen auf Petrinetze sein; so kann ein Netz eine Stelle eines Netzes belegen. Stellen können eine Kapazität haben, d. h. eine nicht negative, ganzzahlige Angabe zu der Menge an Marken, mit der die Stelle maximal belegt sein darf.

Kanten verbinden Stellen und Transitionen und sind gerichtet. Eine Kante, die von einer Stelle zu einer Transition gerichtet ist, positioniert die Stelle in den Vorbereitungsbereich einer Transition. Ist eine

Kante von einer Transition zu einer Stelle gerichtet, gehört diese zum Nachbereich der Transition. Kanten können Beschriftungen haben; für S/T-Netze sind dies ganze Zahlen größer Null. Man nennt diese Beschriftung Kantengewicht.

Transitionen (engl. Transitions) modellieren aktive Komponenten. Die Aktivität wird durch einen Schaltvorgang abstrahiert. Wenn eine Transition schaltet, werden so viele Marken aus Stellen im Vorbereich entnommen wie durch die jeweiligen Kantengewichte angegeben ist, und so viele Marken den Stellen im Nachbereich zugefügt wie jeweils durch die Kantengewichte spezifiziert ist. Eine Transition kann nur dann schalten, ist also schaltbereit, wenn jede Stelle im Vorbereich mit mindestens so vielen Marken belegt ist wie das zugehörige Kantengewicht spezifiziert, und wenn für jede Stelle im Nachbereich die Summe aus ihrer aktuellen Belegungszahl mit Marken und dem Gewicht der auf sie gerichteten Kante nicht größer ist als ihre Kapazität.

Für die folgenden Ausführungen werden Assoziationen zwischen Stellen und Räumen sowie zwischen Transitionen und Raumübergängen für die Modellierung der Gebäudetopologie hergestellt. Für Kanten gilt die Aussage von [Reisig 1985], S. 8: „Ein Pfeil stellt niemals eine Systemkomponente dar, sondern immer eine abstrakte, gedankliche Beziehung zwischen Komponenten, also z. B. logische Zusammenhänge, Zugriffsrechte, räumliche Nähe oder unmittelbare Kopplung.“ Betrachtet man Petrinetze als Modellierungsbasis der hier vorgestellten Methode, sind Kanten für „räumliche Nähe“ bzw. eine topologische Beziehung eine passende Repräsentation. Die Kantenausrichtung als Repräsentation wird in Tabelle 6 in Beziehung zum Modellierungsgegenstand „Gebäudetopologie“ gesetzt.

Petrinetze erscheinen nicht nur aufgrund der Nähe zu den Modellierungsgegenständen geeignet, sondern auch aufgrund der Nähe zu den in 4.1 ausgewählten Basismethoden des Architekturentwurfs, etwa zur Modellbildung: „Zu diesem Zweck stellt es [Anm. d. Autors: das zitierte Buch] eine an der Entwurfspraxis orientierte Systematisierung der wichtigsten Methoden vor und erläutert sie anhand zahlreicher Beispiele. Es kommt dabei ohne alle Mathematik aus, und zwar deshalb, weil die Petrinetze in besonderem Maße auf die Intuition hin entwickelt worden sind, ja die Intuition ausdrücklich unterstützen und präzisieren sollen. Dies ist auch nötig, denn ein wesentlicher Aspekt des Systementwurfs ist die Kommunikation zwischen Auftraggeber und Entwurfsteam, und einem Auftraggeber kann und soll kein großer formaler Kalkül zugemutet werden.“ [Reisig 1985], S. 3.

Die Aktivität einer Transition führt zur Zustandsänderung des Petrinetzes durch Änderungen der Belegung der Stellen mit Marken. Diese Schaltvorgänge und Zustandsänderungen können gedanklich durchgespielt und schriftlich aufgezeichnet werden. Simulationswerkzeuge unterstützen den Modellierer eines Systems in der Erstellung eines Petrinetzmodells und bei dem „Durchspielen“ des Schaltverhaltens. Weitere unterstützte Aufgaben sind die Analyse des Netzes hinsichtlich seiner Eigenschaften, die Aussagen über das nebenläufige Verhalten des modellierten Systems zulassen. Simulationsprogramme sind seit geraumer Zeit verfügbar; der Autor war selbst beteiligt an der Entwicklung zweier Petrinetz-Simulatoren für S/T-Netze: [CAPsNET 1991] in [ASK 1993] wurde ausgezeichnet mit dem Preis der Fachgruppe Informatik der RWTH Aachen in 1991, sowie [WinPetri 1993]. WinPetri ist für die Lehre optimiert worden und fand weitere Verbreitung in der Lehre der Software-Technik [Balzert 1996], insbesondere zur Anforderungsanalyse und Modellierung. Das in dieser Arbeit herangezogene Programm Renew [Renew 2015] unterstützt die Modellierung mit weiteren Netztypen, insbesondere mit den hier betrachteten Referenznetzen [Kummer 2002]. Vorwegnehmend wird es in dieser Arbeit beispielhaft zur Darstellung des Realisierungsansatzes herangezogen.²⁵

²⁵ Laut Lizenzbedingungen ist die Verwendung mit Renew erstellter Arbeiten erlaubt: „You are permitted to use works that you create with Renew (i.e., Java stubs, net drawings, EPS/PDF output, simulation states, and other exported data) without restrictions.“ [Renew Lizenz].

4.3.3 Bewertung ausgewählter Modellierungskonzepte

Die Modellierungsbasis der hier vorgestellten Methode wird durch eine Bewertung aus den in 4.3.2 vorgestellten Modellierungskonzepten ausgewählt. Die Bewertung der Konzepte erfolgt auf Basis der in 4.3.1 aufgestellten Anforderungen. Die Anforderungen werden anhand der Modellierungsgegenstände aus 4.2 betrachtet, denn es ist erstrangig, dass das zugrunde gelegte Modellierungskonzept gestattet, passend die Modellbildung für die hier definierte Domäne des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs zu unterstützen.

Die Bewertung erfolgt durch Skizzieren der Anwendung der Modellierungsmittel der in Betracht gezogenen Modellierungskonzepte. Es werden Vorschläge beschrieben, mit welchen Modellierungsmitteln die Anforderungen bezüglich der Modellierungsgegenstände (vergleiche Tabelle 4) erfüllt werden können. Aus der Skizze soll hervorgehen, welches Modellierungskonzept allein durch seine Mittel und Ausrichtung die größte Nähe zu den Anforderungen aus Sicht des Gebäudeentwurfs, aus methodischer Sicht und hinsichtlich der zuvor eingeführten Modellierungsgegenstände hat. Es besteht kein Anspruch auf abschließende Ausarbeitung von Modellierungsansätzen für diese Anforderungen auf Basis der in Betracht gezogenen Konzepte.

Anforderungen bezüglich des Modellierungsgegenstandes ²⁶	UML		Petrietz ²⁷	
	Anwendungsfalldiagramm	Interaktions- / Kommunikations-/ Sequenzdiagramm	Stellen/Transitionen-Netz (S/T-Netz)	Referenznetz ²⁸
G E B Ä U D E T O P O L O G I E				
Modell der Gebäudetopologie	- Die Gebäudetopologie wird als Kommunikationsdiagramm modelliert. Ein Objekt repräsentiert einen Raum oder eine Raumfunktion (s. u.: Gebäude- bzw. Raumfunktionsnutzung) - Anwendungsfall beschreibt ergänzend Modelleigenschaften, die durch andere Diagramme nicht ausgedrückt werden können, z. B. Funktionsnutzungsarten.		- Das S/T-Petrietz beschreibt die Gebäudetopologie und Lagebeziehung der Räume und Raumübergänge. - Konstellation <i>Stelle 1, gerichtete Kante zur Transition, gerichtete Kante zur Stelle 2</i> repräsentiert einen Raumübergang von einem Raum in einen anderen.	Das Systemnetz repräsentiert, wie das S/T-Netz, die Gebäudetopologie.
Raumbezeichnungen und Raumtypisierung	- Bezeichnung des Raums im Anwendungsfall - Typisierung kann durch Vererbung (Klassendiagramm) modelliert werden.	Ein Raumobjekt mit eindeutiger Bezeichnung entstammt der Klasse mit dem gewünschten Abstraktionsniveau, z. B. bezüglich Typisierung.	Eine Stelle des S/T-Netzes repräsentiert einen Raum.	Eine Stelle des Systemnetzes repräsentiert einen Raum.
Raumkapazität und -belegungszahl	Keine Repräsentation	- Die Raumkapazität wird als Bedingung einer Nachricht zwischen Objekten spezifiziert. - Die Belegungszahl wird als Attribut des Raumobjektes definiert.	- Die Raumkapazität wird durch die Stellenkapazität repräsentiert. - Die Belegungszahl-änderung erfolgt durch Änderung der Stellenbelegung mit Marken.	- Die Raumkapazität wird durch die Stellenkapazität von Stellen im Systemnetz repräsentiert. - Die Raumkapazität und -belegungszahl können als Liste in einem separaten Referenznetz gespeichert werden. Die Angaben können dadurch in komplexeren Transitionsregeln verwendet oder manipuliert werden.

²⁶ Vergleiche Tabelle 4.

²⁷ Eine detaillierte Gegenüberstellung findet sich in Tabelle 10: Auswahl eines Petrietztyps für die Modellierung der Gebäudenutzung.

²⁸ Referenznetze werden in 4.4.2 beschrieben. Die folgende Information ist ausreichend für diese Gegenüberstellung. Es besteht die Möglichkeit, Netze als Token in einem Netz zu modellieren. Des Weiteren können Transitionen eine Art Methoden haben, die in ihrer Deklaration Uplink und an der Stelle ihres Aufrufs Downlink genannt werden.

Anforderungen bezüglich des Modellierungsgegenstandes	UML		Petrinetz	
	Anwendungsfalldiagramm	Interaktions- / Kommunikations-/ Sequenzdiagramm	Stellen/Transitionen-Netz (S/T-Netz)	Referenznetz
Raumübergänge (Transitionen) und damit Verbindung von Räumen	Keine Repräsentation	- Ein Übergang von Raum A nach B wird als Versand einer Nachricht move von A nach B repräsentiert. - Ein Parameter identifiziert den Übergang (Transitionsid.)	- Eine Transition des S/T-Netzes repräsentiert einen Raumübergang. - Eine gerichtete Kante modelliert die Bewegungsrichtung. - Um einen Raumübergang zwischen zwei Räumen zu modellieren, darf der Vor- und Nachbereich jeder Transition jeweils genau eine Stelle haben.	- Die Modellierung erfolgt wie beim S/T-Netz, jedoch im Systemnetz. - Eine Transitionsid. wird repräsentiert durch einen Parameter eines sogenannten Uplinks einer Raumübergangstransition.
• Übergangstypen	Keine Repräsentation	- Jeweils ein Parameter der Nachricht move spezifiziert den Typ bzw. die Barriereangabe zur Prüfung, ob er bzw. sie zur Angabe im Nutzungsfall zur Bewegung passend ist. - Alternativ wird jeweils eine Bedingung der Nachricht move spezifiziert.	Keine Repräsentation	Der Typ wird repräsentiert durch einen Parameter des Uplinks einer Raumübergangstransition.
• Barriereangaben	Keine Repräsentation		Keine Repräsentation	Die Angabe wird repräsentiert durch einen Parameter des Uplinks einer Raumübergangstransition.
N U T Z U N G				
Bewegung zwischen Räumen	- Gebäude wird als Systemkontext modelliert. - Anwendungsfälle beschreiben textuell Bewegungen in Räume hinein.	- Ein Sequenzdiagramm gibt eine Folge aus Bewegung und Funktionsnutzung fest vor, die je durch Nachrichten repräsentiert werden. - Eine Nachricht zwischen zwei Raumobjekten repräsentiert eine Bewegung in Richtung des Nachrichtenaufrufs (wie oben).	Das bewegte Objekt wird im S/T-Netz als unteilbare Marke repräsentiert.	Das bewegte Objekt im Systemnetz ist ein Elementnetz, welches einen Nutzungsfall repräsentiert.

Anforderungen bezüglich des Modellierungsgegenstandes	UML		Petrinetz	
	Anwendungsfalldiagramm	Interaktions- / Kommunikations- / Sequenzdiagramm	Stellen/Transitionen-Netz (S/T-Netz)	Referenznetz
Gebäude- bzw. Raumfunktionsnutzung mit verschiedenen Nutzungsarten	- Anwendungsfälle beschreiben textuell die Nutzung von Funktionen in Räumen und Nutzungsarten. - Nutzer werden als Akteure in Beziehung zum Raum und zur Funktion gesetzt. - Anwendungsfälle beschreiben die Nutzung durch mehrere Akteure.	Kommunikationsdiagramm/ Gebäudetopologie: - Eine Nachricht eines Raums, die an ihn selbst gerichtet ist, spezifiziert eine Raumfunktion. - Pro Funktion wird eine Nachricht mit eindeutigem Namen definiert. - Die gemeinsame Nutzung erfordert die Modellierung der Synchronisation der repräsentierenden Nachricht des Raumobjektes in mehreren Nutzungsfällen. Diese wird durch ein Sequenzdiagramm beschrieben.	- Eine Funktion eines Raums wird durch eine Transition repräsentiert, die mit der Stelle verbunden ist, die diesen Raum repräsentiert. - Die Nutzungsanforderung ist nicht in separatem Netz modellierbar, welches mit dem Gebäudetopologie-Netz verbunden werden kann.	Die Modellierung erfolgt durch eine Kombination aus Systemnetz für die Gebäudetopologie und Elementnetz für den Nutzungsfall.
Zugangsberechtigungen	Ein Anwendungsfall beschreibt die Registrierung und Abfrage der Zugangsberechtigungen zu Räumen, d. h. die Berechtigungen für die Bedingungen der Nachricht move, die im Kommunikationsdiagramm der Gebäudetopologie geprüft werden.	- Prüfung der Zugangsberechtigung des Nutzungsfalls durch Nachricht move anhand der Transitionsid. - Alternativ wird eine Bedingung der Nachricht move spezifiziert.	Keine Repräsentation	- Die Zuordnung der Zugangsberechtigungen für Raumübergänge zu Nutzerrollen und Nutzungsfällen wird in einem Referenznetz modelliert. - Sie werden in der Logik der Raumübergangstransition, d. h. im Systemnetz, ausgewertet.
N U T Z E R				
Nutzerrollen	- Nutzer werden durch Akteure repräsentiert und in Beziehung zu einem Anwendungsfall gesetzt. - Ihre Rollen werden durch ihre Beziehungen in Anwendungsfällen definiert.	Keine Repräsentation	Keine Repräsentation	- Nutzer werden reduziert auf ihre Rolle repräsentiert. Jedem Nutzungsfall wird eine Nutzerrolle zugeordnet. - In einem Nutzungsszenario werden verschiedene Nutzerrollen modelliert.

Anforderungen bezüglich des Modellierungs- gegenstandes	UML		Petrinetz	
	Anwendungs- falldiagramm	Interaktions- / Kommunikations-/ Sequenzdiagramm	Stellen/Transitionen- Netz (S/T-Netz)	Referenznetz
N U T Z U N G S F A L L				
Nutzungsfall, Eigner ist Nutzer	• Ein Nutzungsfall wird als Anwendungsfall modelliert, da die Rolle des Nutzers durch den Akteur definiert wird und diese in Beziehung zur Nutzung steht. • Die Reihenfolge aus Bewegungen und Funktionsnutzungen wird mit einem Sequenzdiagramm spezifiziert. • Die Synchronisation der gemeinsamen Nutzung wird durch Steuerung im Sequenzdiagramm modelliert (Synchronisationsmethoden).		Keine Repräsentation, da eine Marke atomar ist und selbst keine veränderlichen Zustände repräsentiert.	• Ein Nutzungsfall wird als Elementnetz modelliert. • Eine Stelle repräsentiert einen Raum. • Eine Transition zwischen zwei Stellen repräsentiert eine Bewegung zwischen den Räumen. • Eine Transition repräsentiert eine Raumfunktionsnutzung, indem ein Uplink an der Transition die gewünschte Funktion benennt.
Nutzungsfall- identifikation	• Im Anwendungsfall spezifizierbar.	Keine Repräsentation	Keine Repräsentation	• Sie wird in einem Referenznetz verwaltet.
Ablauf der Nutzung von Funktionen	Keine Repräsentation	• Der Ablauf wird durch Lebenslinien eines Sequenzdiagramms beschrieben.	• Im S/T-Netz ist dies durch eine Reihe Stellen beschränkt modellierbar.	• Der Ablauf wird im Elementnetz durch eine Reihe von Stellen modelliert.
G E B Ä U D E N U T Z U N G				
Verbindung von der Bewegung zwischen Räumen und dem Raumübergang sowie von Raumfunktions- nutzungs- anforderung und Raumfunktions- angebot	Die Verbindung wird hergestellt über durchgehende Bezeichnungen der in den Diagrammen verwendeten Klassen und Objekte.	Keine Repräsentation	• Es ist keine Verbindung getrennter S/T-Netze möglich.	• Die Verbindung wird hergestellt durch: • eine Referenzierung zwischen System- und Elementnetz • Synchronous Channels zwischen Raumübergangsanforderungstransition (unpräzise: Bewegungstransition) des Elementnetzes und Raumübergangstransition des Systemnetzes • Synchronous Channels zwischen Raumfunktionsanforderungstransition des Elementnetzes und Raumfunktions- transition des Systemnetzes.

Anforderungen bezüglich des Modellierungs- gegenstandes	UML		Petrinetz	
	Anwendungs- falldiagramm	Interaktions- / Kommunikations-/ Sequenzdiagramm	Stellen/Transitionen- Netz (S/T-Netz)	Referenznetz
E I N O R D N U N G U N D A N K N Ü P F U N G S P U N K T E A N B I M				
Gebäude bzw. alle	Die Abbildung auf die IFC wird in 5.2 detaillierter für die ausgearbeitete Modellierungsmethode beschrieben. Folgende Abbildung kann erfolgen: • Klassen (Raumobjekte) des Kommunikationsdiagramms auf ifcSpace; eine Raumkapazität aus einer Bedingung der Nachricht move auf die der Klasse ifcSpace zugeordneten Eigenschaft ifcSimpleProperty • Nachricht move gemäß Übergangstyp auf ifcElement; Barriereangabe aus move auf die der Klasse ifcElement zugeordneten Eigenschaft, i. d. R. ifcSimpleProperty • Eine Umkehrung kann nur partiell erfolgen, weil z. B. die Richtung der Nachrichten im Kommunikationsdiagramm keine Entsprechung in einem IFC-Modell hat.		• Reduzierte Abbildung zwischen S/T-Netz und BIM-Modell	• Detailliertere Abbildung zwischen Systemnetz und BIM-Modell wird in 5.2 erläutert.

Tabelle 6: Bewertung ausgewählter Modellierungskonzepte — Anforderungen bezüglich Modellierungsgegenständen

Nach der Bewertung der Modellierungskonzepte hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen bezüglich der Modellierungsgegenstände sollen die Konzepte nun noch hinsichtlich des methodischen Bezugs auf ausgewählte Basismethoden des Architekturentwurfs aus 4.1 eingeschätzt werden. Dabei wird nicht auf alle Aspekte der betrachteten Modellierungskonzepte eingegangen, sondern es werden gezielt passende Elemente der Modellierungssprachen herausgegriffen, die die Modellbildung unterstützen können. Inwieweit dies wirklich möglich ist, wird in der Tabelle 7 erörtert. Tiefer gehende Ausführungen zum Einsatz von Petrinetzen im Systementwurf finden sich in [Reisig 1985] sowie zur Modellierung mit der UML in [BRJ 2006].

Methode / · Aspekte	UML	Petrinetz (Pn)
Modellbildung		
• Abstraktion und vereinfachte Darstellung für Entwerfer	• Die UML vereint über ihre zwanzigjährige Entwicklungsgeschichte die bewährten Modellierungsmittel, um folgende Ziele zu erreichen: „1. Systeme von der Konzeptstufe bis hin zu ausführbaren Artefakten mit objektorientierten Methoden modellieren 2. Die Probleme bearbeiten, die sich aus der Größe komplexer erfolgsentscheidender Systeme ergeben 3. Eine Modellierungssprache entwickeln, die sowohl von Menschen als auch von Maschinen verwendet werden kann“ [BRJ 2006], S. 19.	• Pne. sind auf die Intuition hin konzipiert worden. • Pne. werden seit Jahrzehnten entwickelt, verwendet und verfeinert. • Pne. bilden die Grundlage neuerer Modellierungskonzepte, etwa von Modellierungsmitteln der UML zur Verhaltensbeschreibung. Aktivitäts-, Interaktions- und Zustandsdiagramme stimmen mit Pnen. in einigen Aspekten überein und bilden ihre spezifischen Modellierungsschwerpunkte aus.
• Konvention	• Die UML definiert syntaktische und semantische Regeln zur Modellbildung und Empfehlungen zur Nutzung der Modellierungsmittel.	• „Die drei vorgestellten Prinzipien, das Zerlegen in aktive und passive Komponenten, das Übergehen von der statischen Zerlegung zu dynamischem Verhalten und das konstruktive Aufeinanderbeziehen einzelner Netzdarstellungen, bilden das Gerüst einer integrierten Technik zum Systementwurf mit Netzen.“ [Reisig 1985], S. 10.
Simulation		
• Darstellung der interessierenden Aspekte	Mit Bezug auf die hier in 4.2 definierten Modellierungsgegenstände sind zusammengefasst folgende interessierende Aspekte darzustellen: • Gebäudetopologie, Nutzung (Nutzer), Nutzungsfall und Gebäudenutzung.	
	• Die Darstellung der Gebäudetopologie (Kommunikationsdiagramm) ist durch die UML bezüglich des interessierenden Aspekts der Nutzung möglich, ebenso die Modellierung eines Nutzungsfalls (Anwendungsfall-, Sequenzdiagramm). • Es existieren Simulationswerkzeuge mit Schwerpunkt auf Aktivitäts-, Sequenz- und Zustandsdiagrammen [UML-Tools 2016]. • Die Gebäudenutzung kann nicht anschaulich als Verbindung von Nutzungsfallinstanzen (Sequenzdiagramm) und Gebäudetopologie (Kommunikationsdiagramm) simuliert werden, wie Referenznetze es erlauben.	• Pne. erlauben in jedem Entwurfsstadium den Übergang von der Beschreibung statischer Komponenten zur Darstellung dynamischen Verhaltens, siehe 4.3.2. • Pne. unterstützen die Simulation von Zustandsveränderungen durch Schalten der Transitionen des Netzes und damit des dynamischen Verhaltens des modellierten Systems, hier die Nutzung eines Gebäudes aus Sicht seiner Topologie. • Referenznetze erlauben zusätzlich die Simulation des Zusammenspiels von Netzen, die Referenzen zueinander besitzen. Dadurch kann die Gebäudenutzung als Verbindung von Gebäudetopologie und Nutzungsfall in ihrem dynamischen Verhalten dargestellt werden.
• Risiko- und Kostenminimierung	• Grundsätzlich gilt für die UML das zu Pne. Formulierte.	• Pne. sind darauf ausgerichtet, in der Phase des Requirements Engineering frühzeitig Entwurfsentscheidungen in statischer und dynamischer Hinsicht zu unterstützen.

Methode / · Aspekte	UML	Petrinetz (Pn)
Top-Down		
• Vereinfachung durch vorkompilierte Struktur	• Die UML gibt Syntax und Semantik der Diagramme vor. • Die Diagramme sind spezialisiert auf Modellierungsfragestellungen. • Es sind bezüglich der hier in 4.2 definierten Modellierungsgegenstände mehrere Diagramme erforderlich.	• Pne. unterstützen die gleichrangige Behandlung aktiver (Raumübergang bzw. Bewegung) und passiver Komponenten (Räume). • Petrinetze sind geeignet, Modelle auf einem höheren Abstraktionsniveau zu beginnen und durch Verfeinerung zu detaillieren. Durch Verfeinerung kann eine Transition oder Stelle durch ein Petrinetz nach bestimmten Regeln ersetzt werden [Reisig 1985], Kap. 6.
• Akzeptanz der Modellierungsmethode	• Beide Modellierungskonzepte werden weltweit mit etwas unterschiedlichen Einsatzschwerpunkten verwendet. • Beide Konzepte haben gleiche Ziele bezüglich des Zwecks der Modellierung, u. a. Verständnisbildung, Kommunikationsunterstützung, Planungsgrundlage, nachzulesen in [BRJ 2006], Kap. 1, und [Reisig 1985].	• Pne. sind besonders geeignet für die Modellierung nebenläufiger Prozesse und Systeme. Fasst man Nutzungsfälle als solche Prozesse und eine Gebäudetopologie als System für diese Prozesse auf, erkennt man die hohe Passgenauigkeit, die zu hoher Verständlichkeit von Petrinetz-basierenden Modellen für Gebäudetopologie und Nutzungsfall führt.
	• Einsatzschwerpunkt der UML liegt in der Konzeption, dem Design und der Entwicklung von Software-intensiven Systemen. • Die UML hat ein breites Spektrum an Modellierungsmitteln und eine zugunsten der Verständlichkeit und breiten Verwendbarkeit entwickelte Ausdrucksfähigkeit.	
Bottom-Up		
• Exploration, unterstützt durch formalen Rahmen	• Anwendungsfälle werden im Requirements Engineering zur schrittweisen Modellierung der realen Welt eingesetzt, in die das zu schaffende, meist Software-intensive System eingebettet werden soll. • Dabei wird die Erkundung und die Verständnisbildung durch verschiedene Sichten auf die reale Welt und das zu schaffende System durch Anwendungsfälle und weitere Modellierungsmittel der UML unterstützt. • Exploration für die Modellierungsgegenstände aus 4.2 wird unterstützt durch Diagramme für: ◦ Anwendungsfälle für Nutzungsfälle ◦ Kommunikation für Gebäudetopologie ◦ Sequenz für Nutzungsfall-Abläufe	• Pne. sollen die Intuition ausdrücklich unterstützen und präzisieren. • Die Methode Bottom-up wird bei Petrinetzen durch Einbettung unterstützt. Einbettung beschreibt das Ergänzen eines Netzes um ein weiteres [Reisig 1985], Kap. 6. • Durch Einbettung können Netze für Teile des Modellierungsgegenstandes, etwa die Gebäudetopologie, entworfen und nach Regeln zusammengefügt werden.
Fallbasiertes Schließen		
• Überprüfung wiederverwendbarer Lösung	• Die UML-Diagramme erlauben eine anschauliche Prüfung. • Die UML unterstützt die Modellierung von Frameworks und insbesondere Architekturmustern. • Diese sind Gegenstände der Wiederverwendung.	• Pne. unterstützen die anschauliche Prüfung aufgrund ihrer graphischen Darstellung. Die Gebäudetopologie ist dadurch ersichtlich. • Größere Netze erfordern jedoch Unterstützung z. B. durch Suchverfahren.

Methode / · Aspekte	UML	Petrinetz (Pn)
• Rückgriff auf bewährte Lösungen	• Ein Rückgriff auf Frameworks, die für Softwarearchitekturen entwickelt wurden, soll durch Dokumentation in UML-Modellen unterstützt werden. • Die Wiederverwendung erfolgt schwerpunktmäßig von verallgemeinerten Konzepten und Lösungen. • Bezüglich der Modellierungsgegenstände aus 4.2 ist vorstellbar, dass Kommunikationsdiagramme Vorlage für neu zu entwerfende Gebäudetopologiemodelle sind oder Sequenzdiagramme allgemeiner gefasst werden, um die repräsentierten Nutzungsfälle gegen andere Gebäude zu prüfen.	• Pne. können durch definierte Verfahrensschritte (z. B. Verfeinerung, Einbettung) aus einem Bestand rekombiniert werden. So kann auf Netze für Gebäudetopologiemodelle zurückgegriffen werden. • Referenznetze erlauben die Modularisierung von Netzen für bestimmte fachliche und technische Aufgaben. Bezüglich der Fachlichkeit können wiederholt auftretende Nutzungsfälle mit Referenznetzen zur Wiederverwendung modelliert werden.
Designfokus / Logical Zoom		
• Schrittweise Entwicklung eines Entwurfsansatzes hinsichtlich eines interessierenden Gesichtspunkts	• Die UML bietet in den hier betrachteten Modellierungsmitteln die Möglichkeit der iterativen und inkrementellen Entwicklung der Modelle, die sich aufeinander beziehen können. • Ein Anwendungsfalldiagramm für die Beschreibung des Nutzungsfalls kann verfeinert und ergänzt werden. • Die Ausprägungen eines Interaktionsdiagramms können für den interessierenden Gesichtspunkt in den Fokus rücken. • Ein Sequenzdiagramm wird entwickelt, um den Nutzungsablauf in einem Nutzungsfallmodell bis zur gewünschten oder erforderlichen Genauigkeit auszuprägen. • Ein Kommunikationsdiagramm wird verfeinert, d. h. in seiner Darstellung der Nachrichten — hier Raumübergänge — ausgebaut und um Raumobjekte ergänzt, bis die Gebäudetopologie hinreichend genau spezifiziert ist.	• Pne. bieten die „Möglichkeit, frühzeitig auf hohem Niveau und in beliebiger Präzision von der Beschreibung statischer Komponenten zur Darstellung dynamischen Verhaltens überzugehen.“ [Reisig 1985], S. 3 • Als grundlegende drei Prinzipien nennt Reisig etwa: 1.) Zerlegung des Modellierungsgegenstandes — hier der Gebäudetopologie — in aktive und passive Komponenten — hier Raumübergänge bzw. Räume; 2.) Übergang vom statischen Modell zum dynamischen Verhalten — hier Modell der Gebäudenutzung; 3.) Konstruktives Aufeinanderbeziehen der Netzdarstellungen — hier Gebäudetopologiemodell und Nutzungsfallmodell, [Reisig 1985], S. 10. • Für schrittweise Entwicklung (Punkt 1.) kommen Verfeinerung und Einbettung zur Anwendung, siehe Bottom-Up und Top-Down, detaillierte Beschreibung in [Reisig 1985], Kap. 7.
• Betrachtung der Eigenschaften des Gebäudemodells	• Die Gebäudetopologie kann anhand des Kommunikationsdiagramms untersucht werden: ◦ Ihre Räume auf ihre Größe und Funktionsangebote ◦ Raumübergänge auf Typen und Barriereangaben • Ein Nutzungsfall kann hinsichtlich der angeforderten Bewegungen und Funktionsnutzung betrachtet werden. • Die Gebäudenutzung kann mit diesen Diagrammtypen und gängigen Werkzeugen noch nicht simuliert werden, vergleiche oben zu Simulation.	• Pne. veranschaulichen die Struktur aus aktiven und statischen Komponenten inkl. ihrer Attribute. • Statische Komponenten sind Räume, aktive repräsentieren Raumübergänge der Gebäudetopologie. • Pne. stellen das dynamische Verhalten dar. Eigenschaften des Gebäudes, die durch Nutzungsfälle gefordert werden, können durch Simulation überprüft werden.

Tabelle 7: Bewertung ausgewählter Modellierungskonzepte bezüglich Basismethoden des Architekturentwurfs

Die Gegenüberstellung zeigt, dass beide Konzepte Sprachelemente besitzen, die die Anforderungen bezüglich der Modellierungsgegenstände erfüllen und als Basis der hier entwickelten Methode dienen können.

Es gibt Anforderungen, die durch Petrinetze aufgrund ihrer Sprachmittel passender erfüllt werden als durch die dargestellten Mittel der UML. Grundsätzlich fällt auf, dass die Struktur eines Petrinetzes mit zwei Knotenarten zu einer Gebäudetopologie passt, wenn man Stellen mit Räumen und Transitionen mit Raumübergängen assoziiert. Unter dieser Sichtweise sind Petrinetze eine passendere Modellierungsmethode, was in folgenden Anforderungen besonders deutlich wird, vergleiche auch Tabelle 6:

- Gebäudetopologie — Modell der Gebäudetopologie
- Gebäudetopologie — Raumübergänge (Transitionen) und damit Verbindung von Räumen
- Nutzung — Bewegung zwischen Räumen
- Nutzungsfall mit der Anmerkung, dass die Anforderungen nicht durch ein S/T-Netz, sondern nur durch ein Referenznetz erfüllt werden.
- Gebäudenutzung — Verbindung von der Bewegung zwischen Räumen und dem Raumübergang sowie zwischen einer Raumfunktionsnutzungsanforderung und einem Raumfunktionsangebot.

Bezüglich der Basismethoden des Architekturentwurfs sind beide Methoden in vielen Punkten gleichwertig geeignet, die einzelnen Aspekte der Basismethoden zu unterstützen. Die UML verfügt über spezialisierte Sprachmittel in Form von Diagrammtypen, die in Kombination zur Modellierung eingesetzt werden müssten. Petrinetze haben eine Struktur aus wenigen Elementen und sind spezialisiert auf die Modellierung von nebenläufigen Systemen, die durch Zustände und Übergänge modelliert werden können. Bereits die oben genannte Assoziation zwischen Petrinetzelementen und Gebäudetopologieelementen macht Petrinetze zu einer sehr passenden Modellierungsbasis der hier vorgestellten Methode. Die Gegenüberstellung zeigt, dass Petrinetze die Basismethode der Simulation in der geforderten Form passend unterstützen können. Dagegen sind bisher für Diagrammtypen der UML für von diesen Modellierungsgegenständen abweichende Modellierungsperspektiven Simulationsverfahren entwickelt worden.

4.4 Modellierung mit Petrinetzen

Petrinetze wurden von C. A. Petri in den 1960er Jahren entwickelt [Petri]. Ihr Einsatzschwerpunkt liegt in der Modellierung verteilter Systeme und nebenläufiger Prozesse. Petrinetze sind in den vergangenen Jahrzehnten in ihren Grundlagen, Erweiterungen und Anwendungsgebieten differenziert entwickelt worden. Wie in 4.3.3 ausgeführt, sind Petrinetze passend für die in dieser Arbeit vorgestellte Anwendungsdomäne und insbesondere zur Abbildung der Modellierungsgegenstände und geeignet zur Unterstützung der ausgewählten Basismethoden des Architekturentwurfs, die Grundlage für die in dieser Arbeit vorgestellte Modellierungsmethode sind.

In diesem Abschnitt werden nicht die Formalismen und detaillierten Definitionen repetiert, sondern die Grundlagen in 4.4.1 und relevanten Aspekte eines speziellen Typs von Petrinetzen in 4.4.2 erläutert, die für diese Arbeit relevant sind. Es wird in 4.4.3 an Beispielen gezeigt, dass Petrinetze auch in Architektur und Bauwirtschaft Anwendungsfelder haben. Und schließlich wird eine detailliert begründete Auswahl eines Petrinetztyps als Grundlage der Metamodellbildung für die vorgestellte Modellierungsmethode des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs in 4.4.4 getroffen.

4.4.1 Grundlagen

Petrinetze werden in zahlreichen Werken der Informatik behandelt. Für diese Arbeit seien die Grundlagen auf Basis der Einführungen von Reisig beschrieben. In [Reisig 1986] wird die Theorie der Petrinetze detailliert erläutert und in [Reisig 1985] wird dargestellt, wie Petrinetze für den Entwurf von Systemen angewendet werden können. Für diese Arbeit sind sogenannte Stellen/Transitionen-Petrinetze, kurz S/T-Netze, interessant und werden daher im Folgenden zusammenfassend dargestellt. Die Relevanz wird in 4.3.3 anhand der Modellierungsgegenstände begründet und differenziert bewertet.

Ein Petrinetz repräsentiert ein System durch seine Zustände und Veränderungen von einem Zustand zu einem Folgezustand. Die Beschreibung eines Zustandes besteht aus einer Menge von Stellen oder Plätzen (engl. Places) sowie deren Belegung mit sogenannten Marken (engl. Token). Stellen repräsentieren passive Komponenten eines Systems. Die Veränderung der Belegung basiert auf Übergängen, sogenannten Transitionen, den aktiven Komponenten. Der Zusammenhang zwischen Stellen und Transitionen wird durch gerichtete Verbindungen, dargestellt als Pfeile, immer zwischen einer Stelle und einer Transition dargestellt. Formal ist ein Petrinetz ein Graph, der aus Knoten und sie verbindende Kanten besteht. Die Knoten sind Stellen und Transitionen; es handelt sich um einen bipartiten Graphen. Stellen, die durch eine gerichtete Kante zu einer Transition mit dieser verbunden sind, gehören zum Vorbereich der Transition. Diese Kante sei als Vorbereichskante bezeichnet. Stellen, die mit einer auf sie gerichteten Kante ausgehend von einer Transition verbunden sind, gehören zum Nachbereich dieser Transition. Diese Kante sei als Nachbereichskante bezeichnet.

Stellen können mit Marken belegt sein, im Falle der hier betrachteten S/T-Netze mit einer ganzzahligen Anzahl an Marken. Die Belegung einer Stelle repräsentiert einen Zustand. Eine Transition repräsentiert eine Aktivität, die zu einer Änderung der Belegung und damit des repräsentierten Zustandes führt. Eine alternative Interpretation beschreibt Stellen als Kanäle, über die Systembestandteile, abstrakt als Instanzen bezeichnet, miteinander kommunizieren [Reisig 1985], S. 7 f.; hierbei repräsentieren Stellen Speicher, und Transitionen beschreiben aktive Komponenten, die erzeugen, weitergeben oder speichern können. Objekte, die erzeugt, weitergegeben oder gespeichert werden, sind Marken.

Die Veränderung des Zustandes eines Petrinetzes wird repräsentiert durch die Veränderung der Belegung der Stellen mit Marken. Diese Veränderung basiert auf dem sogenannten Schalten der Transitionen, die die Belegung der Stellen mit Marken nach festgelegten Regeln verändern: Der Schaltvorgang besteht aus der Ermittlung der Schaltbereitschaft und dem Schalten. Im ersten Schritt wird für jede Transition ermittelt, ob sie schaltbereit ist. Im zweiten Schritt werden aus den schaltbereiten Transitionen einige ausgewählt, die schalten und dadurch die Belegung der Stellen mit Marken verändern. Es entsteht ein Folgezustand des Petrinetzes. Bei der Ermittlung der Schaltbereitschaft einer Transition wird geprüft, ob die Belegung der Stellen im Vorbereich ausreicht. Dies wird anhand der Stellenbelegung und der Kante geprüft. Im Falle der hier betrachteten S/T-Netze ist eine Transition schaltbereit, wenn alle Stellen des Vorbereichs mit mindestens einer Marke belegt sind. S/T-Netze können auch mit Kanten definiert werden, die ein sogenanntes Kantengewicht besitzen. Hierbei handelt es sich um eine natürliche Zahl. In diesem Fall ist eine Transition schaltbereit, wenn jede Stelle des Vorbereichs mit mindestens einer Anzahl an Marken belegt ist, die größer oder gleich dem Kantengewicht der Vorbereichskante dieser Transition ist.

Ein klassisches und einfaches Beispiel ist die Modellierung des Erzeuger-Verbraucher-Systems, wie in [Reisig 1985], S. 27 ff. didaktisch aufbereitet. Durch das Petrinetz werden zwei Rollen, nämlich Erzeuger und Verbraucher, repräsentiert, die durch einen Kanal kommunizieren. Der Erzeuger erzeugt ein Objekt (z. B. ein Produkt oder eine Nachricht), welches er dem Verbraucher über einen Kanal bereitstellt. Der Verbraucher nimmt das Objekt entgegen und verbraucht es.

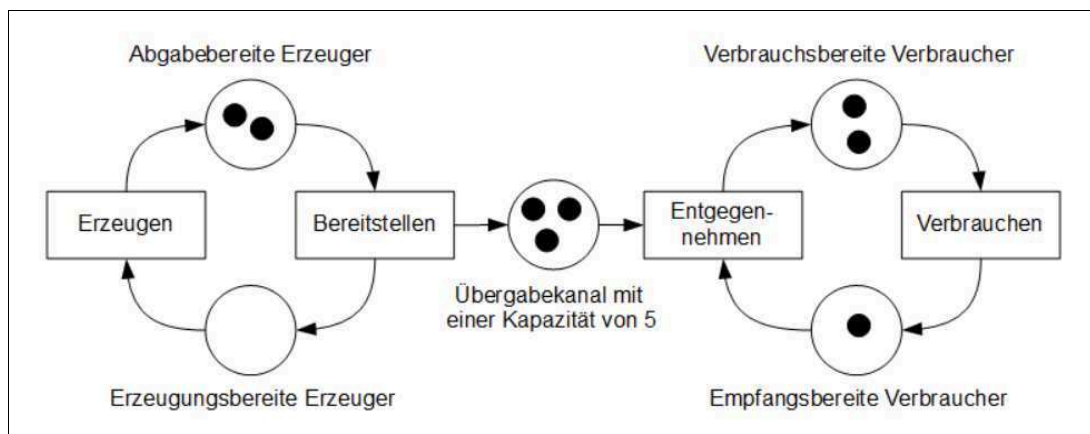


Abbildung 3: Petrinetz für das Erzeuger-Verbraucher-System

In der Abbildung 3, nach [Reisig 1985], S. 29, wird ein Modell gezeigt, das mehrere Erzeuger und Verbraucher repräsentiert. Die Erzeuger bzw. Verbraucher werden jeweils durch Marken in ihren Erzeuger- bzw. Verbraucher-Kreisläufen modelliert. Das erzeugte und über den Kanal bereitgestellte Produkt wird auch als Marke repräsentiert. Auf der Erzeugerseite ist zu erkennen, dass zwei Erzeuger bereit sind, ein Produkt bereitzustellen. Dies wird durch zwei Marken in der Stelle „Abgabebereite Erzeuger“ repräsentiert. Auf der Verbraucherseite ist ein Verbraucher bereit, ein bereitgestelltes Produkt entgegenzunehmen, während zwei Verbraucher nach Entgegennahme bereit sind, das Produkt jeweils zu verbrauchen. In dem Übergabekanal befinden sich drei bereitgestellte Produkte, die entgegenzunehmen sind. In diesem Beispiel ist eine Erweiterung des S/T-Netzes um eine Aufnahmekapazität der Stelle des Übergabekanals dargestellt. Diese Kapazität wird in der Erweiterung der Regel des Schaltvorgangs berücksichtigt: Eine Transition ist schaltbereit, wenn für jede Stelle des Nachbereichs gilt, dass die Summe aus der Belegung mit Marken dieser Stelle und dem Kantengewicht der Nachbereichskante dieser Transition die Kapazität nicht überschreitet. Im Beispiel haben alle Kanten das Gewicht Eins, welches in der Notation nicht dargestellt werden muss.

An diesem Beispiel wird deutlich, dass die Marken nicht zu unterscheiden sind. Es sind keine Individuen, und sie haben keinen Typ oder eine Rolle. Sie beeinflussen aus sich heraus nicht den Schaltvorgang. Sie sind anonyme Markierungen eines Zustandes.

Mit Blick auf die Modellierungsgegenstände der hier vorgestellten Methode könnten die Stellen eines S/T-Netzes Räume repräsentieren und Transitionen Raumübergänge. Die Marken repräsentierten dann die Belegung eines Raums durch ein atomares Objekt ohne eigene Nutzungsabsicht. Der Schaltvorgang würde diese Objekte über Raumübergänge von Raum zu Raum weitergeben. Eine Raumkapazität könnte durch eine Stellenkapazität repräsentiert werden. Diese Überlegungen zur Abbildung der Modellierungsgegenstände auf S/T-Netze sind in Tabelle 6 in 4.3.3 ausführlich dargestellt, wobei in der detaillierten Gegenüberstellung in 4.4.4 deutlich wird, dass S/T-Netze nicht geeignet sind, insbesondere aufgrund der atomaren und absichtslosen Marken, eine Gebäudenutzung auf Basis von Nutzungsfällen zu repräsentieren.

Petrinetze sind für vielerlei Anwendungsbereiche differenziert worden. Folgende Bereiche werden in [Reisig 1985], S. 1 genannt:

- „Modellierung von Hardware und Kommunikationsprotokollen
- von parallelen Programmen und verteilten Datenbanken
- insbesondere aber im Rahmen des Requirements Engineering, also in den ersten Phasen des Systementwurfs.“

Auch wenn Petrinetze ihren Ursprung in der Informatik haben und daher Anwendungsfelder in diesem Umfeld schwerpunktmäßig unterstützen, sind darüber hinaus gehende Anwendungsbereiche und zu modellierende Systeme mit entsprechender Abstraktionsfähigkeit und Kreativität erschließbar und wurden auch erschlossen wie die Beispiele in 4.4.3 und die vorliegende Arbeit zeigen. In dem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass Reisig den Begriff System bewusst nicht eingeschränkt auf die Informatik verwendet, so dass er auch dem in dieser Arbeit fokussierten Anwendungsbereich Raum gibt: „Mit Systemen sind in diesem Buch nicht ausschließlich Rechner gemeint. Vielmehr umfasst der Begriff „System“ hier organisatorische, d. h. logistische, technische, und rechnerintegrierte Systeme aller Art, in denen geregelte Flüsse von Gegenständen und Informationen von Bedeutung sind.“ [Reisig 1985], S. 1. Ersetzt man in diesem dreißig Jahre alten Text „Gegenstände“ durch „Objekte“ oder „Nutzer“ und interpretiert „geregelte Flüsse“ als Bewegungsanforderungen, dann ist die Brücke zu der Idee der vorliegenden Modellierungsbasis hergestellt. Allerdings sind wie in 4.3.3 angedeutet und in 4.4.4 detailliert erläutert S/T-Netze nicht ausreichend ausdrucksstark, um die gestellte Aufgabe des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs als Modellierungsbasis zu unterstützen.

Neben S/T-Netzen wurden weitere Varianten entwickelt, darunter Petrinetze, in denen die Marken differenziert werden können, etwa Netze mit individuellen Marken oder gefärbte Petrinetze mit variablen Kantenbeschriftungen²⁹ [Reisig 1985], S. 37 ff.. In gefärbten Petrinetzen sind die Marken im Unterschied zu S/T-Netzen³⁰ nicht atomar und können durch Nummerierung unterschieden werden oder sind Terme, die sich aus Daten zusammensetzen, z. B. Personenangaben aus Name, Vorname, Geburtsdatum, Adresse. Die Kanten besitzen dann Beschriftungen als Variablen, um diese komplexen Marken in ihrer Struktur weitergeben zu können an Transitionen, die in Ihrer Schaltlogik die Verarbeitung der Daten ermöglichen, z. B. das Vergleichen oder Berechnen von Ergebnissen, die an eine Stelle im Nachbereich der Transition weitergegeben werden.

In dieser Arbeit können nicht alle Varianten vorgestellt werden, sondern es werden die sogenannten Referenznetze oder auch Objektnetze in Betracht gezogen, weil sie wie in 4.4.4 beschriebene Grundlage der Modellbildung für die hier erforderlichen Modellierungsgegenstände sein können. Im Abschnitt 4.4.2 werden die für das Verständnis der vorgestellten Modellierungsmethode relevanten Aspekte erläutert.

²⁹ Es wird auch die Bezeichnung Inschriften und aus dem Englischen Inscriptions verwendet.

³⁰ In Abbildung 3 sind die Marken des S/T-Netzes als atomare und nicht unterscheidbare, schwarze Marken dargestellt.

4.4.2 Für diesen Ansatz relevante Aspekte von Referenznetzen

Die in 4.3.3 begründete Vorauswahl der Petrinetze hat bereits den Typ der Referenznetze skizziert. In diesem Abschnitt sollen die eingesetzten Elemente der Referenznetze erklärt werden, ohne die Theorie und Herleitung dieser zu repetieren. Hier sei auf die umfassende Arbeit von [Kummer 2002] verwiesen, auf die auch in den nachfolgenden Erklärungen Bezug genommen wird, die folgende Elemente umfassen:

- Netze als Markenobjekte
- Beschriftungssprache
- Erweiterungen von Stellen, Transitionen und Kanten
- Referenzierung von Java-Programmcode
- Petrinetz-Werkzeug Renew [Renew 2015].³¹

Wie in [Kummer 2002], S. 30 ff. dargestellt, sind Referenznetze hergeleitet aus Stellen/Transitionen-Petrinetzen (S/T-Netzen) über gefärbte Petrinetze und Netze mit synchronen Kanälen. Netze mit synchronen Kanälen sind die Vorstufe der Referenznetze und unterscheiden sich dadurch, dass es nur eine Netzinstanz des jeweiligen gezeichneten Netzes gibt. Bei Referenznetzen kann es von einem Netz eine natürliche Anzahl an Instanzen geben, die auch Exemplare oder Objekte genannt werden. Referenznetze vereinen die Eigenschaften der anderen genannten Petrinetztypen.

Exemplare eines Referenznetzes sind Objekte, die von anderen Netzen erzeugt und referenziert werden können. Die Referenz auf ein solches Objekt tritt in einem referenzierenden Netz als Marke auf. In frühen Arbeiten zu diesem Thema sind diese Netze als Markenobjekt konzipiert und bezeichnet worden [Valk 1998]. Anschaulich kann man sich vorstellen, dass die Referenz auf solch ein Netz von Stelle zu Stelle über die Transitionen geschaltet werden kann — wie atomare oder individuelle Marken mit Daten. Das Referenznetz wird zum Objekt der Manipulation durch die schaltenden Transitionen [Valk 2004]. Das Schaltverhalten ist abhängig von der Auswertung des im Vorbereich liegenden referenzierten Netzobjekts, genauer seiner Daten und Struktur, von den Kanteninschriften im Vor- und Nachbereich, die auch Rechenvorschriften auf Daten der Netzobjekte durchführen können, und von den Stellen im Nachbereich.

Wie auch Petrinetze mit individuellen Marken erfordern Referenznetze eine Beschriftung der Kanten und wegen der Möglichkeit der Verarbeitung der Daten der Netzexemplare eine Sprache mit mathematischen Ausdrücken, Operatoren und minimalen Datenstrukturen, um zusammengehörige Daten abbilden zu können. Hierfür ist für Referenznetze eine *Beschriftungssprache* definiert und im Werkzeug Renew implementiert worden [Kummer 2002], S. 247 ff.. Diese Sprache lehnt sich an die etablierte Programmiersprache Java an, für deren Auswahl neben der Verbreitung Gründe wie Zukunftssicherheit, Unterstützung der Beschriftungssprache, Objektorientiertheit, Eigenschaften der Laufzeitumgebung, Nebenläufigkeit und Verfügbarkeit preiswerter Entwicklungsumgebungen genannt werden [Kummer 2002], S. 238 ff..

Die *Beschriftungssprache* enthält Variablen, die Objektreferenzen, Zahlen, Zeichenketten und komplexe Daten aufnehmen können, entsprechend der Programmiersprache Java. Variablen können Bestandteile von Termen und Ausdrücken sein, um Rechenvorschriften zu beschreiben. Variablen in Referenznetzen sind ungetypt. Es ist auch möglich durch explizite Typangabe (Cast) die Belegung

³¹ Laut Lizenzbedingungen ist die Verwendung mit Renew erstellter Arbeiten erlaubt: „You are permitted to use works that you create with Renew (i.e., Java stubs, net drawings, EPS/PDF output, simulation states, and other exported data) without restrictions.“ [Renew Lizenz].

auf Typen einzuschränken, um eine höhere Zuverlässigkeit bei der Ausführung (Simulation) des Referenznetzes zu erreichen. Zeichenketten werden als Folge von Zeichen aus Buchstaben, Sonderzeichen, Zahlen durch doppelte Anführungszeichen am Anfang und Ende begrenzt. Für die Bildung von Termen stehen Operatoren zur Verfügung, etwa für die Grundrechenarten, und Verknüpfung von Zeichenketten. Boole'sche Operatoren wie *UND*, *ODER* oder die *Negation* für die Bildung logischer Ausdrücke mit Wahrheitswerten *WAHR* und *FALSCH* sind noch nicht Bestandteil. Eine von der Zuweisung abweichende Semantik hat der Gleich-Operator $=$. Während er in Java als Zuweisungsoperator der linken Seite des Ausdrucks $x = \text{Term}$ das Rechenergebnis des Terms zuweist, erfolgt in Referenznetzen eine Auswertung beider Seiten und Belegung auch von Variablen innerhalb des Terms, so dass die Gleichheit erzielt wird. Man spricht hier von Gleichheitsspezifikation. Dies erfolgt durch die später beschriebene Unifikation. Die Auswertung des Gleichheitsoperators liefert einen Wahrheitswert *WAHR* oder *FALSCH*. Die linke und rechte Seite des Operators dürfen Terme sein, so dass z. B. ein Ausdruck $x+y = y+x$ zulässig ist. Um komplexe Daten zu bilden, stehen als Datenstrukturen Tupel und Listen zur Verfügung. Tupel werden syntaktisch durch eckige Klammern [und] umschlossen und bestehen aus einer Folge von durch Kommata getrennten Termen. Listen werden durch geschweifte Klammern { und } begrenzt und die Elemente durch Kommata voneinander getrennt.

Stellen in Referenznetzen können benannt werden, um in komplexen Netzen das anschauliche Verständnis zu erhöhen. Im Metamodell und den Beispielen dieser Arbeit wurde hiervon Gebrauch gemacht, wie in den Modellen in 5.1 zu sehen ist. Stellen in Referenznetzen enthalten Marken unterschiedlicher Art. Die simpelste Form ist die atomare Marke, die in Renew durch [] repräsentiert wird. Es können Zahlen, Zeichenketten und komplexere Marken wie Tupel in Stellen liegen, von denen in dieser Arbeit intensiv Gebrauch gemacht wird. Und schließlich sind Referenzen auf Netzexemplare Marken in Stellen. Vorwegnehmend werden in dieser Arbeit Nutzungsfälle durch Referenznetze repräsentiert, und die Referenzen auf diese werden in Raum-Stellen des Gebäudetopologie-Netzes abgelegt, um zu repräsentieren, dass der Nutzungsfall eines Nutzers sich in einem Raum befindet. Stellen kann eine Typdefinition zugeordnet sein, um eine höhere Zuverlässigkeit ähnlich den o. g. Variablen zu erzielen. Dies wird in dieser Arbeit nicht genutzt.

Transitionen können ebenso zum anschaulichen Verständnis benannt werden. Auch dies wurde im Metamodell und in den Beispielen dieser Arbeit genutzt. Transitionen können Beschriftungen (engl. *Inscriptions*) zugeordnet sein. Dabei handelt es sich um Ausdrücke der oben beschriebenen Beschriftungssprache. Es können mehrere Ausdrücke einer Transition zugeordnet werden, wobei es keine Berücksichtigung einer Reihenfolge im Unterschied zur sequentiellen Anweisungsfolge einer imperativen Programmiersprache gibt. Für die Auswertung der Ausdrücke zur Ermittlung der Schaltbereitschaft wird die Unifikation verwendet, die weiter unten beschrieben ist. Ein besonderer Ausdruck für Transitionen ist die Erzeugung eines neuen Netzexemplars bzw. -objekts durch die Spezifikation *netzExemplar : new net()*, wobei *net* ein definiertes Referenznetzmuster ähnlich einem Typ ist, von dem dieses *netzExemplar* instanziiert, d. h. als Objekt gebildet werden soll. Die Ausdrücke, mit denen eine Transition beschriftet ist, werden bei der Ermittlung der Schaltbereitschaft ausgewertet. Insbesondere werden Variablen durch Unifikation gebunden, um den Wahrheitswert von Gleichheitsspezifikationen zu berechnen. Dieser muss *WAHR* sein, um eine Schaltbereitschaft nicht zu verhindern. Die Schutzanweisung *guard* ist ein weiterer Ausdruck in diesem Zusammenhang. Er dient der Ermittlung einer Wahrheitsbedingung. Der Ausdruck muss zu *WAHR* ausgewertet werden, damit eine Transition schalten kann. Die Schutzanweisung wird verwendet, wenn nicht nur ein Ausdruck auf Gleichheit geprüft werden soll, sondern z. B. auf Ungleichheit oder wenn verknüpfte Ausdrücke ausgewertet werden. Im Unterschied zum Gleichheitsoperator erfolgt bei der Auswertung keine Weitergabe bzw. kein freier Informationsfluss durch die Bindung von Werten an Variablen. Es wird lediglich die Erfüllbarkeit der Bedingung geprüft, aber keine Werte der dafür

gebundenen Variablen bereitgestellt, wie es bei der Auswertung der reinen Gleichheitsspezifikation der Fall ist [Kummer 2002], S. 248.

Die *Unifikation* ist in logischen und funktionalen Programmiersprachen das Mittel zur Ausführung des spezifizierten Programmcodes. Der deklarative Charakter und insbesondere die beliebige Reihenfolge der Ausdrücke in Beschriftungen von Transitionen erfordert die Unifikation zur Durchführung des Schaltvorgangs von Transitionen. Zum Verständnis seien hier die wesentlichen Aspekte genannt, ohne bereits dokumentierte Erkenntnisse tiefer gehend zu wiederholen. Hier sei auf [Kummer 2002], S. 297 ff. für die theoretische Herleitung und auf [Renew 2015], S. 46 f. für die praktische Anwendung in Renew verwiesen. Die Beschriftungen von Kanten können Variablen oder auch Tupel mit Variablen sein. Die Beschriftungen einer Transition können sich auf diese Variablen oder Tupel beziehen. Die Wertübergabe zwischen Eingangskante und Transition sowie Transition und Ausgangskante muss die Daten und Variablen zusammenbringen. Hier ist ein Matching erforderlich. Zum Beispiel führt ein Matching von $[x, 4, 3] = [l, y, z]$ zur Zuordnung von l zu x , 4 zu y und 3 zu z . Stellen wir uns eine Transition mit der Beschriftung $x = y$ vor. Nehmen wir an, die Transition hat zwei eingehende Kanten von Stellen, wobei die eine Kante mit x und die andere mit y beschriftet ist. Dann kann die Transition immer nur dann schalten, wenn in jeder Stelle mindestens eine Marke, z. B. Zahl, vorhanden ist, die sich auch in der anderen findet. Da zusätzlich mehrere solcher aufzulösender Ausdrücke einer Transition zugeordnet werden können, reicht einmaliges Matching nicht aus, sondern es muss eine Variablenbelegung gefunden werden, die für alle Ausdrücke der Transition eine Lösung derart ist, dass diese Ausdrücke die Schaltbereitschaft ihrer Transition ermöglichen. Dazu muss eine gefundene Lösung in Form einer Variablenbelegung in weitere Matchingvorgänge eingehen. Im Falle einer nicht weiterführenden Belegung muss durch Backtracking ein neuer Ansatzpunkt mit einer weiteren Lösung gefunden werden, um mit dieser weitere Matchings zu probieren. Der Vorgang wird wiederholt, bis eine Lösung gefunden ist oder es keine gibt. Um die Schaltbereitschaft final ermitteln zu können, ist auf eine endliche Belegungsmöglichkeit zu achten. Dies ist bei dem Entwurf des Metamodells und konkreter Gebäudetopologie-Modelle sowie Nutzungsfälle zu beachten, da nicht terminierende Unifikationsvorgänge mit dem genutzten Werkzeug Renew nicht ausgeschlossen werden können.

Weitere Beschriftungen sind *Methoden-Up-* und *Downlinks*. Eine Transition kann einen *Uplink* definieren. Syntaktisch handelt es sich um einen Ausdruck, angeführt von einem `:` und gefolgt von einem Bezeichner und einer in Klammern (und) und durch Kommata getrennten Parameterfolge. Ein Uplink hat die Form einer Methode in Programmiersprachen und ist eindeutig pro Referenznetz. Diese bedeutet, dass die Transition wie eine Methode oder Prozedur des Referenznetzes aufgerufen werden kann. Die Parameter sind dabei ungetypt und können im Schaltvorgang verwendet werden. Eine Transition kann mehrere *Downlinks* spezifizieren. Syntaktisch besteht der Ausdruck aus einem Referenznetznamen, gefolgt von einem `:` und gefolgt von einem Bezeichner eines Uplinks einer Transition und einer in Klammern (und) eingefassten Parameterfolge, deren Parameter durch Kommata getrennt sind. Dies bedeutet den Aufruf der mit dieser Uplink-Spezifikation (genauer Signatur) definierten Transition des bezeichneten Referenznetzes. Im Falle, dass eine Methode des eigenen Netzes aufgerufen werden soll, wird das Netz mit dem Schlüsselwort *this* bezeichnet. Für die Ermittlung der Schaltbereitschaft wird nun ermittelt, ob die spezifizierten Transitionen schaltbereit sind. Dazu werden Ausdrücke ausgewertet und durch Unifikation Variablen gebunden. Dies kann aufgrund der durch fortlaufende Downlink-Spezifikationen verbundene Transitionen zu einer weithin abhängigen Transitionenverbindung führen. Eine Transition mit einer Uplink-Definition kann nicht schalten, wenn der Uplink nicht durch eine andere Transition per Downlink aufgerufen wird, weil keine passende Downlink-Uplink-Kombination existiert. Im Schaltvorgang schalten dann die auf diese Weise verbundenen Transitionen und überführen die involvierten Referenznetzexemplare (bzw. -objekte) in neue Zustände. Dabei werden die Informa-

tionen über die Up- und Downlink-Parameter sogar in beide Richtungen gemäß der erfolgten Unifikation ausgetauscht. Diese Kommunikation zwischen den Referenznetzexemplaren über Transitionen durch Down- und Uplinks ist durch die Verschmelzung während des Schaltvorgangs eine synchrone Kommunikation und setzt das Konzept der synchronen Kanäle (engl. Synchronous Channels) um. Die theoretische Herleitung ist in [Kummer 2002], S. 54 ff. und die praktische Realisierung in [Renew 2015], S. 48 ff. beschrieben. Die Ermittlung der Schaltbereitschaft kann auch einen Java-Methodenaufruf auswerten. Insbesondere ist es in der hier verwendeten Referenznetz-Implementierung in Renew möglich, Standard-Bibliotheken und Objekte der Java-Plattform einzubinden.³² Der Aufruf kann zu einer irreversiblen Aktivität einer aufgerufenen Java-Methode führen, die aber erst dann erfolgen soll, wenn die Transition auch schaltet, und nicht bereits bei der Ermittlung der Schaltbereitschaft, die sich als nicht gegeben erweisen kann.³³ Um diesen Seiteneffekt zu vermeiden, können derartige Ausdrücke bzw. Aufrufe durch den besonderen Ausdruck *action* gekennzeichnet werden, so dass sie erst beim Schalten ausgeführt werden. Diese Ausdrücke werden dann allerdings nicht in die Ermittlung der Schaltbereitschaft eingebunden und verwenden nicht die Gleichheitsspezifikation mit dem Operator =, sondern werden wie klassisches Java interpretiert [Kummer 2002], S. 249 f..

Kanten in Referenznetzen sind entsprechend der oben beschriebenen Erweiterungen von Stellen und Transitionen ebenso auf Basis der Beschriftungssprache erweitert. In dem Metamodell der hier vorgestellten Methode werden vier Arten von Kanten verwendet, die hier zusammenfassend vorgestellt werden. Auch hier sei auf die theoretischen Grundlagen in [Kummer 2002], S. 52 zu Testkanten und 355 ff. zur algorithmischen Lösung sowie auf die Beschreibung der praktischen Realisierung in [Renew 2015], S. 37 ff. und 58 ff. verwiesen. In den Modellen dieser Arbeit werden Eingangs-, Ausgangs-, Test- und Verbotskanten verwendet. Alle Kanten können mit Ausdrücken aus Literalen (Zahlen), Zeichenketten, Variablen oder Tupeln beschriftet sein, die in den Schaltvorgang einbezogen werden. *Ausgangskanten*, d. h. Kanten, die von einer Transition zu einer Stelle im Nachbereich ausgehen und entsprechend als Pfeil von der Transition zur Stelle dargestellt werden, sind für den Schaltvorgang nur in einem Aspekt bedeutsam, nämlich für die Auswertung des Ausdrucks ihrer Beschriftung, der zu einer Marke berechnet wird, welche dann in der verbundenen Nachbereichsstelle abgelegt wird. Eine *Eingangskante* geht von einer Vorbereichsstelle aus und führt zu einer Transition. Sie wird dargestellt als Pfeil, der von der Stelle zur Transition gerichtet ist. Ihre Beschriftung wird im Unifikationsvorgang zur Ermittlung der Schaltbereitschaft der Transition ausgewertet. Insbesondere wird per Matching geprüft, ob eine Marke in der Vorbereichsstelle zur Struktur und zu den Werten der Beschriftung passt. Im Falle eines Tupels ["Sander", vorname, gebdatum] als Kantenbeschriftung muss mindestens eine Marke von der Struktur eines Tripels [·, ·, ·] mit dem Wert „Sander“ an erster Position in der Stelle vorhanden sein, damit eine Schaltbereitschaft gegeben ist, z. B. ["Sander", "Herbert", "30.08.1960"]. Die Bindung der Variablen *vorname* und *gebdatum* durch die Unifikation geht in den Schaltvorgang ein. Das Schalten der Transition führt dann wie in S/T-Netzen zum Abzug einer passenden Marke aus der Vorbereichsstelle. *Doppelkanten* sind eine Synthese aus Eingangs- und Ausgangskante, die bewirkt, dass eine abgezogene Marke auch wieder in dieselbe Stelle zurückgelegt wird. Dies findet Anwendung, wenn die Marke eine unteilbare Ressource darstellt, deren Daten für einen durch die Transition repräsentierten Vorgang exklusiv benötigt werden. Erst wenn der Vorgang abgeschlossen ist, wird die Marke und mit ihr die repräsentierte Information wieder in der Stelle verfügbar. *Doppelkanten* werden als Pfeil mit Spitzen an jedem Ende dargestellt. Eine *Testkante* gleicht einer

32 Hiervon wird Gebrauch gemacht zum Schreiben der Nutzungsabfolge von Nutzungsfällen in Protokolldateien wie in 5.1.4 beschrieben.

33 Zum Beispiel könnte in eine Datei die Information geschrieben werden, dass eine Transition schaltet. Passiert dies während der Ermittlung der Schaltbereitschaft, die dann u. U. doch nicht gegeben ist, ist eine falsche Information in die Datei geschrieben worden, die sich auch nicht mehr zurücknehmen lässt.

Eingangskante bezüglich der Auswertung der Schaltbereitschaft, jedoch wird durch den Schaltvorgang keine Marke aus der Vorbereichsstelle entfernt. Eine Testkante wird als Linie ohne Pfeilspitzen dargestellt. Eine *Verbotskante* schließlich hat gegenüber einer Testkante eine negierte Wirkung auf die Schaltbereitschaft. Eine Transition ist schaltbereit, wenn in der Vorbereichsstelle keine Marke liegt, die der Beschriftung der Kante entspricht. Hierbei müssen im Ausdruck der Beschriftung alle Variablen aufgelöst worden sein. Eine Verbotskante wird als Linie mit je einem Kuller an den Enden dargestellt. Übersichtliche Beispiele zu Test- und Verbotskanten sind in den Abbildungen 35, S. 123, bzw. 5, S. 99, dargestellt.

Für die Analyse und Simulation von mit Petrinetzen modellierten Systemen können *theoretische Eigenschaften* des Petrinetzes nützlich sein. Etwa kann mittels eines Erreichbarkeitsgraphen beurteilt werden, ob ein Netz einen bestimmten Systemzustand erreichen kann. Weiterhin kann es interessant sein zu wissen, ob die Simulation eines Netzes in bestimmten Zuständen blockiert, das Netz also nicht lebendig ist. Für die hier vorgeschlagene Methode sind diese Eigenschaften zunächst nicht interessant. [Köhler 2010] gibt aber Erklärungen zu diesen Eigenschaften für elementare Objekt-Systeme (engl. Elementary Object Systems, EOS), die eine vereinfachte Form aus Systemnetz und S/T-Netzen als Elementnetzen sind. Es wird gezeigt, dass für EOS Erreichbarkeit und Lebendigkeit nicht entscheidbar sind.

Das beschriebene theoretische Modell der Referenznetze wurde im Rahmen von Forschungsarbeiten in dem *Petrinetz-Softwarewerkzeug Renew* implementiert [Renew 2015]. Dieses Werkzeug dient der prototypischen Entwicklung des Realisierungsansatzes für die Modelle der in dieser Arbeit vorgestellten Modellierungsmethode. Das Werkzeug umfasst einen Petrinetzeditor zur graphischen Erstellung von Referenznetzen, präzise von Referenznetzmustern, aus denen während der Simulation Referenznetzexemplare (bzw. -objekte) erzeugt werden. Der Editor erlaubt das Zeichnen und Beschriften von Netzen aus Stellen, Transitionen, den o.g. Kantentypen und Beschriftungen wie oben beschrieben. Zusätzliche graphische Elemente erlauben die gestalterische Gliederung zur besseren Verständlichkeit der entworfenen Modelle. Renew verfügt über eine Simulationsumgebung, die in verschiedenen Modi, abhängig von den eingesetzten Referenznetzelementen, ablaufen kann. Die in dieser Arbeit entworfenen Modelle verwenden z. B. Verbotskanten und Java-Sprachelemente, so dass der Simulation ein Timed Java Compiler Formalismus zugrunde liegt, der eine sequentielle Abarbeitung schaltender Transitionen verwendet. Der Simulator bietet dem Nutzer verschiedene Interaktionsstufen: automatischer Ablauf der Simulation, Unterbrechen und schrittweises Schalten von Transitionen, die durch den Simulator automatisch ausgewählt oder auch durch den Nutzer gezielt ausgewählt werden können. Um entworfenen Modelle in ihrem simulierten Verhalten genauer analysieren zu können, erlaubt die Umgebung neben dem Anhalten und schrittweisen Fortschalten der Simulationsschritte auch die Inspektion jedes Simulationsschritts inkl. der Betrachtung von Variablen und Objekten. Das Werkzeug basiert auf Java-Technologie, ist in Java entwickelt und bietet den Zugang zur Java-Umgebung aus Referenznetzen. Möglich wird dadurch die Nutzung von Softwareschnittstellen zu unternehmensweiten IT-Ressourcen wie Dateisystemen, Datenbanken und Web-basierenden Systemen. Diese Basis kann genutzt werden, um eine Integration mit BIM-Werkzeugen zum Austausch von Modelldaten zu realisieren. Ein konzeptueller Ansatz hierzu ist in 5.2 dargestellt. Möglich ist in Renew die Erzeugung und Verwendung von Java-Objekten der Standard-Plattform und eigens entwickelten Java-Klassen, sowie die Verwendung von Renew-Netzelementen, die als Java-Objekte zugänglich sind. Der hier vorgestellte Realisierungsansatz nutzt im Metamodell des Nutzungsfalls die Java-basierende Schnittstelle zum Schreiben von Nutzungsprotokollen in Dateien zur weiteren Auswertung der Nutzung wie in Abbildung 36 dargestellt.

4.4.3 Modellierung mit Petrinetzen in Architektur und Bauwirtschaft

Petrinetze haben eine weite Verbreitung gefunden und werden in vielen Anwendungsbereichen zur Modellierung verwendet, wie in 4.4.1 bereits genannt. Auch in der Domäne der Architektur und Bauwirtschaft findet man Arbeiten unter Verwendung der Petrinetze. Im Folgenden werden zwei verschiedene Verwendungen vorgestellt, die sich aber von der hier vorgestellten Methode in ihrem Zweck und ihren eingesetzten Petrinetztypen unterscheiden. Es soll damit einerseits gezeigt werden, dass die Verwendung von Petrinetzen — trotz ihres Alters — eine sinnvolle und zielführende Methode sein kann. Andererseits sollen typische Verwendungszwecke von Petrinetzen anhand der Domäne der Architektur und Bauwirtschaft dargestellt werden. Es wird deutlich, dass es sich um von dieser Arbeit abweichende Verwendungszwecke handelt.

Die Arbeit von [Chahrour 2007] erweitert die Nutzung von Petrinetzen in der Bauprozessmodellierung, in der seit einigen Jahren Ansätze verfolgt werden, um mit Hilfe der Prozessmodellierung eine Optimierung der Bauprozesse zu erreichen. Die Arbeit fokussiert die Anwendung der Erdbauprozesse von Straßenbauprojekten in der Ausführungsphase. Als Herausforderung werden die Dynamik, Unvorhersehbarkeit und Komplexität insbesondere durch Logistik und Umwelteinflüsse beschrieben. Zur Unterstützung der Ausführungsplanung wird die Methode Simulation zur Analyse dieser Dynamik und Unvorhersehbarkeit angewendet. Insbesondere sollen Prognosen von Entscheidungsfolgen fundiert gegeben werden. Der vorgeschlagene Lösungsansatz verbindet die Modellierung der Bauprozesse durch eine Petrinetz-basierende Simulationsumgebung, die integriert ist mit CAD auf Basis von Produktmodellen. Als Petrinetztyp werden Prädikat-Transitionen-Netze (PrT-Netze) mit individuellen Marken mit Attributen und Transitionen mit Programmlogik zur Veränderung der Markenattribute verwendet. Ereignisse während der Baustellenprozesse werden durch zeitbehaftetes Schalten auf Basis stochastischer Zeitmodellierung repräsentiert. Die vorgestellte Lösung nutzt eine Petrinetz-Simulator-Entwicklungsumgebung (PACE der Fa. IBE Simulation Engineering GmbH) zur Entwicklung eines aufgabenspezifischen Simulators auf Basis PrT-Netzen für Erdbauarbeiten. Die Modellierung der Baustelle wird unterstützt durch Parametrisierung des Simulationssystems durch Integration eines CAD-Systems zum Datenaustausch auf Basis von Produktmodellen. Die Abbildung von für eine Baustelle spezifischen Eigenschaften wie Betriebsmittel oder Geometrie erfolgt durch diese Integration, um Datenredundanz und Mehrfacheingaben zu vermeiden. Die Abbildung der Bauprozesse auf ein PrT-Netz erfolgt auf folgenden Abstraktions-ebenen auf Basis von PACE, [Chahrour 2007] Abschnitt 5.3, S. 76 ff. und Abschnitt 5.6, S. 88 ff.:

- Auf hoher Abstraktionsebene werden die fünf Arbeitsstellen Einschnitte, Dämme, Zwischenlager, Deponien und Förderwege der Erdbaustelle durch Module bzw. Unternetze in PACE repräsentiert, wobei ein Modul mehrere Arbeitsstellen derselben Art zusammenfasst.
- Standardprozesse von Betriebsmitteln, wie z. B. von einem Bagger oder Lastkraftwagen, werden auf ein PrT-Netz abgebildet, welches die Bewegungsarten und Ladevorgänge des Betriebsmittels repräsentiert.
- Betriebsmittel werden als Marken abgebildet und repräsentieren die Transportmittel.
- Erdkörper werden auch als Marken repräsentiert und durchlaufen mit den Betriebsmitteln die Prozesse im PrT-Netz.

Zusammenfassend sind folgende in Tabelle 8 aufgeführten Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu der hier vorgestellten Arbeit festzuhalten.

Vorliegende Arbeit		[Chahrour 2007]: Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau
Domäne	Architektur, Gebäudeentwurf	Bauprozessmodellierung, Erdbau
Phase³⁴	Entwurf, Planung, Umbau	Ausführung
Modell	• Petrinetz: Referenz-/Objektnetz • Integrationsbasis ist eine Java-Umgebung	• Petrinetz: attributierte Prädikat-Transitionen-Netze • Integration mit CAD • Produktmodelle
Methode	Simulation der Nutzung und weitere, siehe 5.3.2	Simulation: Bauprozesssimulation
Vorgehen	Unterstützung des Individualentwurfs, des Reengineerings bei Umnutzung, der Eignungsprüfung für Nutzungsfälle und der Machbarkeitsprüfung, siehe 5.3.3	Unterstützung der Ausführungsplanung, von Prognosen und der Ablaufoptimierung
Verwendung	• Individual- und Spezialbauten • Diagnose zur Bestandsprüfung.	Erdbauprozesse von Straßenbauprojekten

Tabelle 8: Modellierung mit Petrinetzen in Architektur und Bauwirtschaft — Vergleich mit einem Beispiel zur Bauprozessmodellierung

Die Arbeit von [Hübner 2012] zur „Modellbildung und Regelung eines kooperativen Straßenverkehrs mittels Petrinetzen und Konsens-Algorithmen“ hat eine interessante Gemeinsamkeit mit der hier vorgestellten Arbeit, weil die Modellbildung ebenso u. a. auf dem Petrinetztyp der Objektnetze nach [Valk 1998] basiert. Die Domäne tangiert die Bauwirtschaft insofern, als die Modellierung der Verkehrsflüsse als Basis für Regelwerke für autonomes Fahren anhand von Autobahnen erfolgt und interessant ist für die Verkehrswegeplanung. Gegenstand ist die Modellierung des Autobahnverkehrs auf zwei Ebenen durch Petrinetze. Auf der Straßennetzebene werden Modellierungsgegenstände wie Fahrbahn, Straßenabschnitte und Fahrstreifen abgebildet. Auf der sogenannten Formationsnetzebene sind Aufenthaltsräume für Fahrzeuge und deren Interaktion die betrachteten Modellierungsgegenstände. Fahrzeuge werden als Marken in Formationsnetzen abgebildet. Wie schon erwähnt basiert die Modellbildung auf Objektnetzen, wobei Formationsnetze die Markenobjekte eines Straßennetzes sind. In der Terminologie der Objekt- bzw. Referenznetze sind die Formationsnetze Elementnetze des Straßennetzes, welches ein Systemnetz ist. Wie zwischen System- und Elementnetzen vorgesehen, erfolgen auch hier Interaktionen zwischen dem Straßennetz und dem Formationsnetz. Besonders ist hier — auch im Unterschied zu dem in dieser Arbeit vorgestellten Metamodell —, dass die Veränderung einer Fahrzeugformation durch die Änderung der Topologie des Formationsnetzes abgebildet wird und diese Änderung durch das Straßennetz wegen der abgebildeten Straßenverlaufsänderung ausgelöst wird, anschaulich z. B. die Wirkung einer Fahrstreifenreduktion auf die Neuordnung einer Fahrzeugformation [Hübner 2012], S. 89 ff. Die Topologieänderung eines Formationsnetzes besteht aus der Transformation des Petrinetzes, indem durch Verfeinern und Einbetten von Petrinetzen Stellen oder Transitionen durch Teilnetze nach bestimmten Regeln ersetzt werden. Grundlagen hierzu finden sich in [Reisig 1985], S. 67 ff. Auf der Formationsnetzebene findet die Kommunikation zwischen Fahrzeugen für ein koordiniertes autonomes Fahren statt. Hierzu wird die Repräsentation ergänzt durch Konsensalgorithmen außerhalb von Petrinetzen. Transitionen repräsentieren Interaktionen der Fahrzeuge, z. B. Fahrstreifenwechsel und Anpassen der Längsposition in der Formation. Es werden Modelle vorgestellt für

³⁴ Eingordnet nach dem Lebenszyklus aus [BIM 2015], S. 4, anhand dessen das Vorgehen der mit dieser Arbeit vorgestellten Methode eingeordnet wird.

Infrastrukturänderungen wie z. B. Auf- und Abfahrten, die zu einer Topologieänderung des Formationsnetzes führen, und für Verkehrssituationen, wie Anpassungen der Formation, Überholvorgänge, Neubildung von Fahrzeugclustern, etc.. Die Modellbildung nutzt ferner gefärbte Petrinetze zur weiteren Unterscheidung von Fahrzeugagenten.

Tabelle 9 fasst Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu der hier vorgestellten Arbeit zusammen.

Vorliegende Arbeit		[Hübner 2012]: „Modellbildung und Regelung eines kooperativen Straßenverkehrs mittels Petrinetzen und Konsens-Algorithmen“
Domäne	Architektur, Gebäudeentwurf	Straßenverkehrsplanung, autonomes Fahren
Phase³⁵	Entwurf, Planung, Umbau	Verkehrswegeplanung für Autobahnen
Modell	• Petrinetz: Referenz-/Objektnetz • Integrationsbasis ist eine Java-Umgebung	• Petrinetz: Referenz-/Objektnetz • Gefärbte Petrinetze, also Netze mit individuellen Marken, vergleiche vorletzter Absatz in 4.4.1, sowie [Reisig 1985], S. 37 ff.
Methode	Simulation der Nutzung und weitere, siehe 5.3.2	Simulation des Verkehrs und autonomen Fahrens
Vorgehen	Unterstützung des Individualentwurfs, des Reengineerings bei Umnutzung, der Eignungsprüfung für Nutzungsfälle und der Machbarkeitsprüfung, siehe 5.3.3	Unterstützung • der Entwicklung von Technologien des autonomen Fahrens durch Zwischen-Fahrzeug-Kommunikation • der Straßentrassenplanung als Nebenaufgabe
Verwendung	• Individual- und Spezialbauten • Diagnose zur Bestandsprüfung.	• Diagnose von Verkehrsflüssen • Entwicklung autonomen Fahrens.

Tabelle 9: Modellierung mit Petrinetzen in Architektur und Bauwirtschaft — Vergleich mit einem Beispiel zur Modellbildung eines kooperativen Straßenverkehrs mittels Petrinetzen

4.4.4 Auswahl eines Petrinetztyps für die Modellierung der Gebäudenutzung

Die Bewertung von Modellierungskonzepten in 4.3.3 hat gezeigt, dass Petrinetze nicht generell alle Anforderungen an die Modellierungsmethode erfüllen, sondern ein spezieller Typ, nämlich die Referenznetze passende Modellierungssprachelemente aufweisen. In 4.4.1 und 4.4.2 wurden die hier näher betrachteten Netztypen grundlegend erklärt und in 4.4.3 Beispiele zur Veranschaulichung der Modellierung unterschiedlicher Domänen als Hinweis für die Relevanz und ernsthafte Praxis-tauglichkeit der Petrinetze in Architektur und Bauwirtschaft aufgezeigt.

Um die Modellierungsbasis begründet festzulegen, werden in diesem Abschnitt Stellen/ Transitionen-Netze und Referenznetze hinsichtlich der Anforderungen und mit Bezug auf die Modellierungs-gegenstände, wie in 4.3.1 und 4.2 respektive definiert, gegenübergestellt. Aus der Gegenüber-stellung soll die Bewertung hinsichtlich folgender Fragestellung hervorgehen:

Welche Anforderungen bezüglich der Modellierungsgegenstände können durch welche Mittel der Modellierungsbasis vollständig erfüllt werden?

Die beiden Netz-Typen werden zunächst in der Tabelle 10 pro Anforderung gegenübergestellt. Es werden Vorschläge erarbeitet, wie die Modellierungsgegenstände mit den Mitteln des jeweiligen Netztyps modelliert werden können. Aus diesen Modellierungsskizzen wird deutlich, welche Aus-

³⁵ Eingordnet nach dem Lebenszyklus aus [BIM 2015], S. 4, anhand dessen das Vorgehen der mit dieser Arbeit vorgestellten Methode eingeordnet wird.

drucksfähigkeit der betrachtete Petrinetztyp hat, und ob er ausreichend ist, um die jeweilige Anforderung in Bezug auf die Modellierungsgegenstände zu erfüllen. Im Anschluss werden zusammenfassend Antworten auf die o. g. Frage aufgrund der Gegenüberstellung formuliert.

Anforderungen bezüglich des Modellierungsgegenstandes ³⁶	Stellen/Transitionen-Netz (S/T-Netz)	Referenznetz
G E B Ä U D E T O P O L O G I E		
Modell der Gebäudetopologie	• Das S/T-Pertrinetz beschreibt die Gebäudetopologie und Lagebeziehung der Räume und Raumübergänge. • Konstellation <i>Stelle 1, gerichtete Kante zur Transition, gerichtete Kante zur Stelle 2</i> repräsentiert einen Raumübergang von einem Raum in einen anderen.	• Das Systemnetz repräsentiert, wie das S/T-Netz, die Gebäudetopologie.
Raumbezeichnungen und Raumtypisierung	• Eine Stelle des S/T-Netzes repräsentiert einen Raum.	• Eine Stelle des Systemnetzes repräsentiert einen Raum. • Bezeichnungen oder Typisierungen pro Stelle können als Liste in einem separaten Referenznetz gespeichert werden.
Raumkapazität und -belegungszahl	• Die Raumkapazität wird durch die Stellenkapazität repräsentiert. • Die Belegungszahländerung erfolgt durch Änderung der Stellenbelegung mit Marken.	• Die Raumkapazität wird durch die Stellenkapazität von Stellen im Systemnetz repräsentiert. • Die Raumkapazität und -belegungszahl können als Liste in einem separaten Referenznetz gespeichert werden. Die Angaben können dadurch in komplexeren Transitionsregeln verwendet oder manipuliert werden.
Raumübergänge (Transitionen) und damit Verbindung von Räumen	• Eine Transition des S/T-Netzes repräsentiert einen Raumübergang. • Eine gerichtete Kante modelliert die Bewegungsrichtung. • Um einen Raumübergang zwischen zwei Räumen zu modellieren, darf der Vor- und Nachbereich jeder Transition jeweils nur genau eine Stelle haben.	• Die Modellierung erfolgt wie beim S/T-Netz, jedoch im Systemnetz. • Eine Transitionsid. wird repräsentiert durch einen Parameter eines sogenannten Uplinks einer Raumübergangstransition.
• Übergangstypen	Keine Repräsentation	• Der Typ wird repräsentiert durch einen Parameter des Uplinks einer Raumübergangstransition.
• Barriereangaben	Keine Repräsentation	• Die Angabe wird repräsentiert durch einen Parameter des Uplinks einer Raumübergangstransition.
N U T Z U N G		
Bewegung zwischen Räumen	• Die Bewegung von einem Raum über einen Raumübergang zum anderen Raum wird durch Schalten der den Raumübergang repräsentierenden Transition und Entnahme einer Marke aus der den Herkunftsraum repräsentierenden Stelle und Hinzufügen in die den Zielraum repräsentierenden Stelle repräsentiert. • Das Objekt, welches bewegt wird, wird im S/T-Netz durch eine unteilbare Marke	• Die Bewegung kann mit Referenznetzen differenziert modelliert werden. Anstelle einer atomaren Marke ist hier ein Elementnetz das bewegte Objekt und repräsentiert einen Nutzungsfall. • Das Systemnetz entspricht repräsentativ dem S/T-Netz mit dem Unterschied in den zusätzlichen Up- und Downlinks der Raumübergangstransition. Diese verbinden den Übergang in der Gebäudetopo-

36 Vergleiche Tabellen 4 und 6.

Anforderungen bezüglich des Modellierungsgegenstandes	Stellen/Transitionen-Netz (S/T-Netz)	Referenznetz
	repräsentiert. Eine Marke trägt keine Information, die die Bewegung bestimmt.	logie mit der Bewegung des Nutzungsfalls (Synchronous Channel). Das Elementnetz repräsentiert den Nutzungsfall, der die Bewegungsanforderung repräsentiert. Hierdurch ist die Bewegung im Unterschied zum S/T-Netz durch die Anforderung definiert.
Gebäude- bzw. Raumfunktionsnutzung mit verschiedenen Nutzungsarten	- Die Modellierung der Funktionsnutzung ist möglich, indem pro Funktion eines Raums eine unterschiedlich beschriftete Transition mit der Stelle, die den Raum repräsentiert, verbunden wird. - Es kann keine Nutzungsanforderung modelliert werden, da die Marke keine diesbezügliche Information trägt (vergleiche Ausführung zur Bewegung zwischen Räumen). - Die Nutzungsanforderung ist nicht in einem separatem Netz modellierbar, welches mit dem Gebäudetopologie-Netz verbunden werden kann.	- Die Nutzung einer Funktion wird mit Referenznetzen modelliert. - Im Systemnetz repräsentiert eine Transition mit einem Downlink (Synchronous Channel) die Nutzbarkeit einer Funktion eines Raumes, der durch die mit der Transition verbundenen Stelle des Systemnetzes repräsentiert wird. - Im Elementnetz modelliert ein Uplink oder eine Kombination zweier Uplinks die geforderte Funktionsnutzung bzw. das Nutzungsszenario. - Die Synchronisation von Down- und Uplinks modelliert die Funktionsnutzung, wobei drei Nutzungsarten modellierbar sind: Nutzung einer einzelnen Funktion, Nutzung einer Funktion zusammen durch mehrere Nutzer oder vordefiniertes Nutzungsszenario aus mehreren Nutzern verschiedener Rollen.
Zugangsberechtigungen	Keine Repräsentation	- Die Zuordnung der Zugangsberechtigungen für Raumübergänge zu Nutzerrollen und Nutzungsfällen wird in einem Referenzteilnetz modelliert. - Die Zugangsberechtigung wird anhand der dem Nutzungsfall zugeordneten Nutzerrolle bestimmt und durch die Logik der Raumübergangstransition ausgewertet.
N U T Z E R		
Nutzerrollen	Keine Repräsentation	- Nutzer werden reduziert auf ihre Rolle repräsentiert. Jedem Nutzungsfall wird eine Nutzerrolle zugeordnet. - In einem Nutzungsszenario werden verschiedene Nutzerrollen modelliert.

Anforderungen bezüglich des Modellierungsgegenstandes	Stellen/Transitionen-Netz (S/T-Netz)	Referenznetz
N U T Z U N G S F A L L		
Nutzungsfall, Eigner ist Nutzer	• Keine Repräsentation, da die Marken atomar sind und selbst keine veränderlichen Zustände repräsentieren. • Eine weitere Ausarbeitung der Modellierung von Gebäudetopologie und Nutzungsfall in einem S/T-Netz dient allenfalls dem Nachweis der theoretischen Machbarkeit. • Es bliebe aber der Nachteil, dass Gebäudetopologie und Nutzungsfall in einem Netz modelliert sind und die Behandlung verschiedener Nutzungsfälle Änderungen des Gebäudetopologie-Netzes erforderten.	• Ein Nutzungsfall wird als Elementnetz modelliert. • Transitionen dienen zur Repräsentation von Bewegung zwischen Räumen, die wiederum durch Stellen repräsentiert werden. • Des Weiteren dienen Transitionen zur Repräsentation der Raumfunktionsnutzung, indem ein Uplink an der Transition die gewünschte Funktion benennt bzw. zwei Transitionen die gemeinsame Nutzung durch Phasen des Zusammenkommens und der Nutzung spezifizieren.
Nutzungsfallidentifikation	Keine Repräsentation	• Ihre Repräsentation erfolgt in einem Referenznetz und hat eher technischen Charakter.
Ablauf der Nutzung von Funktionen	Ein Ablauf der Nutzung von Funktionen, also eine geforderte Reihenfolge der Nutzung von Funktionen kann nur beschränkt modelliert werden: • Das S/T-Netz repräsentiert die Gebäudetopologie, Transitionen können Funktionsangebote repräsentieren. • Die Reihenfolgespezifikation kann durch ein Teilnetz bestehend aus einer Folge von Stellen und Transitionen modelliert werden. Die Funktionen repräsentierenden Transitionen werden mit diesen Stellen durch aus- und eingehende Kanten verbunden, so dass von der i-ten Stelle eine Kante zur Transition der i-ten Funktion verläuft und von dieser eine ausgehende zur (i+1)-ten Stelle usw.. • Die Beschränkung besteht in der festen Verknüpfung von Gebäudetopologie und Reihenfolgespezifikation. Änderungen in Nutzungsanforderungen erfordern den Eingriff in das Gebäudemodell.	Eine geforderte Reihenfolge der Nutzung von Funktionen kann im Elementnetz modelliert werden, welches die geforderten Bewegungen und Funktionsnutzungen repräsentiert. • Im Elementnetz kann die Reihenfolgespezifikation durch ein Teilnetz bestehend aus einer Folge von Stellen und Transitionen modelliert werden. • Die Funktionen repräsentierenden Transitionen werden mit den Stellen durch aus- und eingehende Kanten verbunden, so dass von der i-ten Stelle eine Kante zur Transition der i-ten Funktion verläuft und von dieser eine ausgehende zur (i+1)-ten Stelle usw.. • Da jeder Nutzungsfall in einem Elementnetz modelliert wird, gibt es keine Abhängigkeit zum Systemnetz der Gebäudetopologie oder zu anderen Elementnetzen anderer Nutzungsfälle.
G E B Ä U D E N U T Z U N G		
Verbindung von der Bewegung zwischen Räumen und dem Raumübergang sowie von Raumfunktionsnutzungsanforderung und Raumfunktionsangebot	• Es ist keine getrennte Modellierung von Bewegung und Raumübergang sowie von Raumfunktionsnutzungsanforderung und Raumfunktionsangebot möglich, da die notwendige Verbindung getrennter S/T-Netze nicht möglich ist.	Die Verbindung von Bewegung zwischen Räumen, die im Elementnetz durch eine Transition repräsentiert wird, und einem Raumübergang der Gebäudetopologie, der im Systemnetz ebenso durch eine Transition repräsentiert wird, kann durch zwei Downlinks mit einem Parameter für die verbindende Transitionsinformation modelliert werden. Die zwischen Bewegung und Raumübergang geteilte Transitions-

Anforderungen bezüglich des Modellierungsgegenstandes	Stellen/Transitionen-Netz (S/T-Netz)	Referenznetz
		information kann notwendige Informationen wie Bezeichnungen des Herkunfts- und Zielraums enthalten. Die Information wird durch das Konzept der Unifikation zwischen beiden Methoden geteilt. Eine detailliertere Erklärung der Nutzung dieses Konzeptes wird in 4.4.2 und 5.1.5 gegeben. Die Verbindung wird also hergestellt durch: • eine Referenzierung zwischen System- und Elementnetz • Synchronous Channels zwischen Raumübergangsanforderungstransition (etwas unpräziser: Bewegungstransition) des Elementnetzes und Raumübergangstransition des Systemnetzes • Synchronous Channels zwischen Raumfunktionsanforderungstransition des Elementnetzes und Raumfunktionstransition des Systemnetzes.
E I N O R D N U N G U N D A N K N Ü P F U N G S P U N K T E A N B I M		
Gebäude bzw. alle	Eine Abbildung zwischen einem S/T-Netz, welches die Gebäudetopologie repräsentiert, und einem BIM-Modell ist reduziert auf folgende Elemente (vergleiche hierzu 5.2) möglich: • Abbildung zwischen Stellen für Räume und der IFC-Klasse <code>ifcSpace</code> • Abbildung zwischen der Stellenkapazität und der der Klasse <code>ifcSpace</code> zugeordneten Eigenschaft <code>ifcSimpleProperty</code> (Zuordnung über <code>ifcRelDefinesByProperties</code>) • Transitionen haben im S/T-Netz keinen Typ oder Attribut, so dass nur eine undifferenzierte Abbildung zwischen ihr und der Klasse <code>ifcElement</code> möglich ist.	Eine Abbildung zwischen dem Systemnetz, welches die Gebäudetopologie repräsentiert, und einem BIM-Modell ist in weiteren Details möglich, wie hier skizziert und in 5.2 detaillierter beschrieben: • Die Abbildung zwischen Stellen und <code>ifcSpace</code> kann ergänzt werden um die Modellierungsgegenstände Raumbezeichnungen und -typisierung. • Die Abbildung zwischen Transitionen und <code>ifcElement</code> kann im Systemnetz ergänzt werden um die angeforderten Modellierungsgegenstände Raumübergangstyp und Barriereangaben.

Tabelle 10: Auswahl eines Petrinetztyps für die Modellierung der Gebäudenutzung

Die Gegenüberstellung in Tabelle 10 zeigt, dass Referenznetze die Anforderungen bezüglich der Modellierungsgegenstände umfassender erfüllen. Die eingangs genannte Fragestellung dient nun der Herausarbeitung der relevanten Begründungen für eine Entscheidung, welcher Petrinetztyp die Basis der hier vorgestellten Modellierungsmethode sein sollte. Die Antworten werden in folgender Tabelle 11 so aufbereitet, dass diejenigen Unterschiede deutlich werden, die relevante Ausdrucksfähigkeiten der Modellierungsbasis betreffen.

Welche Anforderungen bezüglich der Modellierungsgegenstände können durch welche Mittel der Modellierungsbasis vollständig erfüllt werden?		
Anforderungen bezüglich des Modellierungsgegenstandes ³⁷	Stellen/Transitionen-Netz (S/T-Netz)	Referenznetz
Erfüllbarkeit und Begründung durch Aufzeigen der verwendeten Modellierungsmittel:		
G E B Ä U D E T O P O L O G I E		
• Modell der Gebäudetopologie	• S/T-Netz mit Stellen, die Räume repräsentieren, und Transitionen, die Raumübergänge repräsentieren	• Systemnetz mit Stellen, die Räume repräsentieren, und Transitionen, die Raumübergänge repräsentieren
• Raumbezeichnungen und Raumtypisierung	–	• Referenznetz
• Raumkapazität und -belegungszahl	• Kapazität und Markierung einer Stelle	• Kapazität und Markierung einer Stelle im Systemnetz
• Raumübergänge (Transitionen) und damit Verbindung von Räumen	• Transition • gerichtete Kanten	• Transition • gerichtete Kanten
◦ Übergangstypen	–	• Transition mit Downlink auf Methoden des Referenznetzes für Transitionslogik
◦ Barriereangaben	–	
N U T Z U N G		
• Bewegung zwischen Räumen	• eingeschränkt, siehe Gebäudenutzung • Marke ist das bewegte Objekt.	• Schalten der Transition des Systemnetzes zusammen mit einer Transitionslogik und synchronem Schalten der Transition im Elementnetz des Nutzungsfalls • Das Elementnetz ist das bewegte Objekt im Systemnetz.
• Gebäude- bzw. Raumfunktionsnutzung mit verschiedenen Nutzungsarten	• Transition mit Einschränkung auf einfache Funktionen ohne Nutzungsarten	• Logik wird abgebildet durch Referenznetze für Raumfunktionsangebote, Raumfunktionsnutzungsanforderung und für die Logik der Nutzung sowie Synchronous Channels.
• Zugangsberechtigungen	–	• Transition (des Raumübergangs) mit Downlink auf Transitionen des Referenznetzes für Transitionslogik, in der die Berechtigungen geprüft werden.
N U T Z E R		
• Nutzerrollen	–	• Referenznetze zur Verarbeitung
N U T Z U N G S F A L L		
• Nutzungsfall	• eingeschränkt in einem Netz mit der Gebäudetopologie modellierbar	• Referenznetz (Elementnetz) pro Nutzungsfall • Uplinks (Synchronous Channels) für Bewegungs- und Funktionsnutzungsanforderung
• Nutzungsfallidentifikation	–	• Referenznetz zur Speicherung
• Ablauf der Nutzung von Funktionen	• eingeschränkt, siehe Nutzungsfall • Stellen im S/T-Netz für Gebäudetopologie und Nutzungsfall	• Stellen im Referenznetz (Elementnetz) des Nutzungsfalls

37 Vergleiche Tabellen 4 und 10.

<i>Welche Anforderungen bezüglich der Modellierungsgegenstände können durch welche Mittel der Modellierungsbasis vollständig erfüllt werden?</i>		
Anforderungen bezüglich des Modellierungsgegenstandes	Stellen/Transitionen-Netz (S/T-Netz)	Referenznetz
Erfüllbarkeit und Begründung durch Aufzeigen der verwendeten Modellierungsmittel:		
G E B Ä U D E N U T Z U N G		
• Verbindung von der Bewegung zwischen Räumen und dem Raumübergang sowie von Raumfunktionsnutzungsanforderung und Raumfunktionsangebot	—	• Die Verbindung wird hergestellt durch: • eine Referenzierung zwischen System- und Elementnetz • Synchronous Channels zwischen Raumübergangsanforderungstransition (etwas unpräziser: Bewegungstransition) des Elementnetzes und Raumübergangstransition des Systemnetzes • Synchronous Channels zwischen Raumfunktionsanforderungstransition des Elementnetzes und Raumfunktions- transition des Systemnetzes.
E I N O R D N U N G U N D A N K N Ü P F U N G S P U N K T E A N B I M		
• Gebäude bzw. alle	• Abbildung zwischen den Teilen des S/T-Netzes, welches die Gebäudetopologie repräsentiert, und IFC	• Abbildung zwischen Systemnetz und IFC • Zusätzlich können die Modellierungsgegenstände abgebildet werden, die nur mit Referenznetzen modellierbar sind.

Tabelle 11: Begründung der Auswahl von Referenznetzen

Aus der Gegenüberstellung geht hervor, dass S/T-Netze wesentliche Modellierungsgegenstände durch eigene Sprachmittel nicht wie angefordert ausdrücken können. Referenznetze sind geeignet, alle Modellierungsgegenstände zu repräsentieren. Ganz wesentlich ist die Abbildbarkeit:

- einer Gebäudetopologie mit Räumen, Raumübergängen und Funktionsangeboten
- einzelner Nutzungsfälle mit Spezifikation der Anforderung von Raumübergängen (auch: Bewegungsanforderung) und von Funktionsnutzung in unterschiedlichen Arten
- der Gebäudenutzung durch Modellierung eines Nutzungsfalls als Elementnetz der Gebäudetopologie als Systemnetz.

Ein Vergleich der beiden Netztypen hinsichtlich des methodischen Bezugs auf ausgewählte Basismethoden des Architekturentwurfs aus 4.1 wird als nicht entscheidend eingeschätzt, da die bereits schon erfolgte Bewertung in Tabelle 7 zeigt, dass bis auf wenige Unterschiede die beiden Petri-Netztypen methodisch gleichwertig sind. Ein wesentlicher Unterschied ist etwa in der Methode *Simulation* zu sehen, die bei Referenznetzen das Zusammenspiel von Referenznetzen für die Modellierungsgegenstände zeigt, z. B. zwischen dem Systemnetz für die Gebäudetopologie und dem Elementnetz für den Nutzungsfall bei der Überprüfung der Gebäudenutzung durch Simulation.

Das Ergebnis der Untersuchung dieses Kapitels 4 ist, dass Referenznetze die Modellierungsbasis der vorgestellten Modellierungsmethode für den nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurf sind.

4.5 Neuartigkeit der Betrachtungsweise und Abgrenzung des vorgestellten Ansatzes

In den vorhergehenden Abschnitten wird erstens die methodische Basis durch Bezug zu Basismethoden des Architekturentwurfs in 4.1 und zweitens die Modellierungsbasis durch Auswahl des Modellierungskonzeptes der Petrinetze in 4.3 und 4.4 aufgrund definierter Anforderungen des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs in 4.2 hergeleitet. Letztere stützen sich wiederum auf die Herleitungen und Definitionen in 3 zu den Begriffen des konzeptuellen Entwurfs und der Nutzungsorientierung; in diesem Zusammenhang wird in 3.4 auch der aktuelle Stand der Unterstützung des konzeptionellen Gebäudeentwurfs durch Methoden und Lösungen dargestellt und in Bezug zu der in dieser Arbeit verfolgten Modellierungsmethode gestellt. Nun soll nach Herleitung der Basis der methodischen Modellierung und vor der detaillierten Modellierung der Gebäudenutzung in 5 — als logische Konsequenz zur erfolgten Betrachtung des aktuellen Stands — der Ansatz dieser Arbeit zu diesem Status quo abgegrenzt und die Neuartigkeit herausgestellt werden. Dies erfolgt bewusst an dieser Stelle, weil die grundlegenden Charakteristika und Ideen zur Modellbildung und Methode in 4 bereits angelegt sind und in 5 darauf aufbauend die Gestaltung der Modelle erfolgt. In der Kapitelabfolge entsteht so auch eine Symmetrie zu der Beschreibung des aktuellen Stands in 3.4, der nun vergleichend herangezogen, aber nicht repetiert wird.

Die Betrachtung erfolgt anhand von Kriterien, die den in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz und die im Vergleich stehenden Ansätze des Status quo so beschreiben, dass ein Vergleich erfolgen kann. Die Kriterien sind die unterstützte Phase des Bauprojektes, der Verwendungsbereich, die zugrunde liegenden Methoden und die Modellierungsbasis. Zur übersichtlichen Gegenüberstellung werden die betrachteten Konzepte der verschiedenen Ansätze in Tabelle 12 durch die als wesentlich erachteten Charakteristika beschrieben.

Unter der Phase des Bauprojektes wird hier eine Phase des Lebenszyklus eines Gebäudes nach [BIM 2015], S. 4 verstanden, die auch in Abbildung 46, S. 153 in 5.3.3 wiedergegeben wird. Da die betrachteten Ansätze des Status quo im Zusammenhang mit dem konzeptuellen Gebäudeentwurf stehen, unterstützen sie mindestens die Phase des Entwurfs, wie in Tabelle 12 zu sehen ist. BIM ist selbstverständlich angelegt, alle Phasen zu unterstützen. Der Ansatz dieser Arbeit unterstützt Entwurf, Planung und Umbau/Umnutzung, wie in 5.3.3 erläutert.

Die Verwendungsbereiche bzw. die Ziele, die durch den Ansatz erreicht werden sollen, haben einen Zusammenhang zur Phase des Entwurfs und fokussieren ihre Aufgaben, etwa Grundrissgestaltung und -optimierung, Modellprüfung oder Anregung durch Referenzen. Der Ansatz dieser Arbeit kann verwendet werden zum Entwurf von Individual- und Spezialbauten sowie zur Diagnose der Eignung eines gegebenen Gebäudes für eine bestimmte Nutzung.

Die wesentliche Methode der Ansätze ist die Modellbildung, wenn auch entsprechend dem Verwendungsbereich in spezifischen Ausprägungen und auf unterschiedlicher Modellierungsbasis gestaltet. Gemeinsam ist die mehr oder weniger ausgeprägte Stützung auf Basismethoden des Architekturentwurfs wie Top-Down, Bottom-Up, Fallbasiertes Schließen und Designfokus/Logical Zoom. Der Ansatz dieser Arbeit fußt auf den Basismethoden und ganz wesentlich auf den Methoden Modellbildung und Simulation.

Die Modellierungsbasis ist unterschiedlich. Sie reflektiert besonders den Zeitgeist und Fortschritt der verfügbaren Modellierungsmöglichkeiten der Informatik, die allen Ansätzen zugrunde liegt. Ältere Ansätze aus den Hochzeiten der Forschung zur künstlichen Intelligenz und Logik basieren auf entsprechenden prädikatenlogischen Modellen und Realisierungen in der Logik-Programmiersprache PROLOG. Neuere Ansätze nutzen objektorientierte Modelle, so auch BIM-Realisierungen auf Basis der IFC. Der Ansatz dieser Arbeit stützt sich mit Referenznetzen auf eine objektbasierte Modellierung und bewährte Modellierungsbasis für nebenläufige Systeme.

Ansatz	Unterstützte Phasen ³⁸	Verwendungsbereich und Zielsetzung	Wesentliche Methode	Modell
Ansätze, die in Abschnitt 3.4 zusammengefasst werden:				
Muster, Regelwerke und Grammatiken für Grundrisse und Gebäudeformen	Entwurf	• Grundrissgenerierung nach Mustern • Prüfung gegebener Grundrisse und Gebäude	• Iterativ-inkrementelle Modellbildung • Generierung mit Algorithmen auf Basis von Logik-Regelwerken • Prüfung aufgrund von Logik-Regelwerken, die Form-Grammatiken oder Regelwerke repräsentieren	• Pattern Language • Shape Grammars • Logik-Regelwerke (Aussagen-/Prädikatenlogik) • Implementiert z. B. in der Logik-Programmiersprache PROLOG
Space Syntax im CAAD	Entwurf	Grundrissentwurf und Optimierung hinsichtlich sozialer Aspekte wie Öffentlichkeitsgrad von Räumen zur Optimierung der Anordnung von Räumen im Grundriss.	• Berechnung von Indikatoren zur Bemessung des Integrationsgrades von Räumen • Berechnung durch Abstraktion der IFC Gebäudemolldaten des Grundrisses	Graph- und Matrix-Repräsentation auf Basis IFC-Gebäudemolldaten
Modellbildung in frühen Entwurfsphasen, Steinmann	Entwurf	• Unterstützung der Entwurfs-tätigkeit in der Konzeptphase • Modellierung funktionaler Eigenschaften und Abläufe zur Nutzung der Funktionen • Integration aus Entwurfswerkzeugen	Modellbildung: Topologie des Gebäudes zur funktionalen Spezifikation eines Gebäudes in Anlehnung an Bubble Diagrams	Objektorientiertes Modell eines Funktionsplangraphen als Basis für die Überleitung in die geometrische Formfindung, die nicht automatisch stattfindet
Modellbildung in frühen Entwurfsphasen, Kraft	• Entwurf • Planung	• Semantische Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs • Modellprüfung	Modellbildung und -prüfung	BIM-Modell auf Basis von Graphgrammatiken
Model Checking	• Entwurf • Planung	• Modellprüfung spezieller Nutzungsfälle	Modellprüfung auf Basis BIM-Modellbildung	BIM, welches Entitäten eines Gebäudes repräsentiert
METIS	Entwurf	• Unterstützung der Entwurfs-tätigkeit in der Konzeptphase • Anregung des eigenen Entwurfs durch Referenzen auf bestehende Modelle	• Modellbildung • Unterstützung Fall-basierten Schließens	BIM, Schaffung einer Repräsentationsform von Gebäudemodellen, die eine Recherche für den Zugriff auf eine Wissensbasis aus Gebäude-modellen erlaubt
BIM-Werkzeuge	alle Phasen	• Thema Nutzungsmodellierung ist nur ansatzweise berücksichtigt.	Umfassendes Gebäude-modell zur Unterstützung aller Phasen	IFC, teilweise proprietäre Repräsentationsformen der Modelle
Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz, eingeführt in Abschnitt 4 und detailliert ausgeführt in Abschnitt 5:				
Modellierungsmethode, Metamodell und Realisierungsansatz für den nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurf	• Entwurf • Planung • Umbau/ Umnutzung	Unterstützung des Entwurfs oder der Auswahl durch Diagnose von Gebäuden, die formal spezifizierte Nutzungsanforderungen erfüllen	• Modellbildung der Gebäudetopologie und der Nutzungsanforderungen in Form von Nutzungsfällen • Prüfung von Nutzungsanforderungen durch Simulation der Dynamik der Nutzung	Modelle für Gebäudetopologie, Nutzung, Nutzungsfall, Gebäudenutzung auf Basis von Referenznetzen (Petrinetz)

Tabelle 12: Neuartigkeit der Betrachtungsweise und Abgrenzung des vorgestellten Ansatzes

38 Phasen des Lebenszyklus eines Gebäudes nach [BIM 2015], S. 4; vergleiche auch Abbildung 46, S. 153 in 5.3.3.

Zusammenfassend unterstützt der hier vorgestellte Ansatz, wie die bestehenden Ansätze, die Phasen des Entwurfs und zusätzlich der Umnutzung. Insofern ordnet er sich in die etablierten Lebenszyklusphasen ein und ist kein Gegenvorschlag hinsichtlich der generellen Vorgehensweise. Dementsprechend liegt der Verwendungsbereich im Entwurf. Der Ansatz unterstützt, wie auch Model Checking-Ansätze, zusätzlich die Analyse. Der wesentliche Unterschied liegt hier aber in der Möglichkeit der Modellbildung von Nutzung und Nutzungsfällen, anhand derer ein Gebäudemodell — genauer ein Modell der Gebäudetopologie — auf Nutzungsmöglichkeit durch Simulation der Dynamik der Nutzung geprüft werden kann. Daher sind die wesentlichen Methoden die Modellbildung und die Simulation neben den anderen eingebundenen Basismethoden des Architekturentwurfs, also Top-Down, Bottom-Up, Fallbasiertes Schließen und Designfokus/Logical Zoom. Die Modellierungsbasis ist, wie in 4.3 und 4.4.4 hergeleitet, speziell für diesen Anwendungsbereich und die Basismethoden ausgewählt worden und basiert auf Referenznetzen, einem Petrinetztyp. Petrinetze werden, wie in 4.4.3 beschrieben, im Bereich der Architektur und Bauwirtschaft verwendet, mit diesem Ansatz auch im Zusammenhang mit Entwurf, Model Checking und insbesondere dem nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurf.

4.6 Zusammenfassung und Überleitung zur Modellierung

In 4 wird die Modellierungsmethode hergeleitet. Hierbei werden zwei Grundlagen gewählt. Zum einen werden in 4.1 anerkannte Basismethoden des Architekturentwurfs betrachtet. Zum anderen wird die Modellierungsbasis hergeleitet. Dazu werden zunächst die Modellierungsgegenstände in 4.2 definiert. Hieraus abgeleitete Anforderungen in 4.3.1 und die Basismethoden des Architekturentwurfs dienen als Auswahlkriterium für die Bestimmung der Modellierungsbasis. Ausgangspunkt hierbei ist die Suche nach einer existierenden Basis, die verbreitet und bewährt ist und welche die Auswahlkriterien erfüllt. In 4.3 werden Petrinetze anstelle der UML ausgewählt, und in 4.4 wird genauer hergeleitet, dass Referenznetze passend sind, um die Anforderungen zu erfüllen. Beispielhafte Bezüge zur Modellierung mit Petrinetzen in Architektur und Bauwirtschaft zeigen die Aktualität von Petrinetzen als Modellierungsmethode. Die Neuartigkeit dieses Ansatzes wird schließlich in 4.5 durch Bezug auf den in 3.4 dargestellten Status quo der Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs abgegrenzt.

Die Modellierungsmethode wird in 5 auf dieser methodischen Modellierungsbasis gestaltet, d. h., es werden Metamodelle für die Modellierungsgegenstände entworfen und die Methode, das Vorgehen und die Verwendung aufeinander aufbauend beschrieben.

5 Modellierung der Gebäudenutzung zur Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs

„Hence, it is through abstraction, simplification, and selectivity that architecture becomes the kind of diagrammatic information that may become architecture again.“³⁹

Die vorgestellte Modellierungsmethode ist ein Vorschlag, die Modellierung der Gebäudenutzung zur Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs auf Basis von Modellierungsmitteln sowie eines methodischen Vorgehens zu ermöglichen. Die Modellierungsmittel beruhen auf der in 4 ausgewählten Modellierungsbasis und hierauf entworfenen Metamodellen. Der vorgestellte Realisierungsansatz ermöglicht die Verknüpfung der entwickelten Modelle mit dem etablierten BIM. Die hier genannten Verwendungsmöglichkeiten zeigen Einsatzfelder der Methode.

Modellierung der Gebäudenutzung bedeutet genauer die Modellierung des Gebäudes und von Anforderungen an die Nutzung, um die Möglichkeit der Überprüfung der Nutzbarkeit des Gebäudes anhand spezifizierter Nutzungsfälle und eines geeigneten Gebäudemodells zu erreichen.

Begriffliche Definitionen zu dem konzeptuellen Gebäudeentwurf, zur Nutzungsorientierung und zu den Modellierungsgegenständen sind zuvor in 3.1 und 3.2 sowie 4.2 gegeben worden. Modellierungsbasis für die Metamodelle sind Referenznetze, wie in 4.3 und 4.4.4 hergeleitet.

Auf dieser Basis wird die Methode vorgestellt:

1. Metamodellbildung der Modellierungsgegenstände in 5.1
2. Einordnung und Anknüpfungspunkte an BIM und die IFC als Basis eines integrativen Realisierungsansatzes in 5.2
3. Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs in 5.3 .

Die Erfüllung der in 4.3.1 aufgestellten Anforderungen an die Modellierungsbasis wird in 5.3.1 diskutiert. In 5.3.2 wird erläutert, wie die vorgestellte Methode mit grundlegenden Methoden des Architekturentwurfs aus 4.1 zusammenhängt. Es wird das Vorgehen zur Modellierung mit dieser Methode in 5.3.3 beschrieben. Abschließend wird in 5.3.4 gezeigt, welche Verwendung im konzeptuellen Gebäudeentwurf erfolgen kann. Für die Entwicklung der Modelle auf Basis von Referenznetzen wird als beispielhafter Realisierungsansatz das Petrinetz-Werkzeug Renew eingesetzt.⁴⁰

³⁹ [Stapenhorst 2016], S. 199. Das Zitat steht im Zusammenhang mit den Ausführungen von C. Stapenhorst zur Bedeutung von Strukturen und Abstraktion für den Bezug auf Referenzen im Entwurf. Abstraktion und die gezielte Vereinfachung auf Modellierungsgegenstände sind Leitgedanken der hier vorgestellten Bildung des Metamodells als Grundlage für die Modellierung der Gebäudenutzung. Die entstehenden Modelle sind Grundlage eines Architekturentwurfs unter Berücksichtigung der Nutzungsorientierung.

⁴⁰ Wie im Rahmen der Auswahl von Referenznetzen als Modellierungsbasis in 4.4.2 beschrieben, stellt das Petrinetz-Softwarewerkzeug Renew [Renew 2015] Mittel für die Erstellung und Simulation von Referenznetzen bereit. Laut Lizenzbedingungen ist die Verwendung mit Renew erstellter Arbeiten erlaubt: „You are permitted to use works that you create with Renew (i.e., Java stubs, net drawings, EPS/PDF output, simulation states, and other exported data) without restrictions.“ [Renew Lizenz].

5.1 Modellierungsgegenstand — Metamodellbildung

Die Bildung eines Modells für die definierten Modellierungsgegenstände setzt voraus, dass es Modellierungsmittel gibt, mit Hilfe derer solche Modelle gebildet werden können. Diese Mittel werden zusammengefasst und als Metamodell bezeichnet. Im Folgenden wird hergeleitet, wie das Metamodell gestaltet ist. Ausgangspunkt der Modellbildung sind einerseits die in 4.2 definierten Modellierungsgegenstände und andererseits Referenznetze als Modellierungsbasis, die in 4.4.4 ausgewählt wurden.

Das Metamodell besteht aus Struktur und Semantik. Die *Struktur* beschreibt die Elemente, die zur Abbildung der Modellierungsgegenstände und der Anforderungen an sie existieren. Die Elemente sind Entitäten zur Speicherung von Informationen, die zur Repräsentation der Modellierungsgegenstände dienen, und von logischen und operationalen Zusammenhängen, etwa Verarbeitungsregeln, die dynamische Aspekte abbilden. Diese Struktur ist Grundlage jeder Modellbildung und wird für die Modellbildung aus folgenden Modellierungsgegenständen definiert:

- Gebäudetopologie
- Raumbezeichnungen und Raumtypisierung
- Raumkapazität und -belegungszahl
- Raumübergänge (Transitionen), und damit Verbindung von Räumen, mit den Entitäten
 - Übergangstyp
 - Barriereangabe
- Bewegung zwischen Räumen, genauer Raumübergangsanforderung
- Gebäude- bzw. Raumfunktionsnutzung mit folgenden Nutzungsarten: einfache Nutzung, gemeinsame Nutzung und gemeinsame Nutzungsszenarien
- Zugangsberechtigungen
- Nutzungsfall, Eigner ist Nutzer
- Nutzungsfallidentifikation
- Ablauf der Nutzung von Funktionen
- Nutzerrollen
- Verbindung von der Bewegung zwischen Räumen und dem Raumübergang sowie von Raumfunktionsnutzungsanforderung und Raumfunktionsangebot.

Die Metamodelle basieren auf Referenznetzen. Sie umfassen neben der Struktur Modellbildungsvorschriften für die Bildung von Modellen für die Modellierungsgegenstände unter Nutzung der Strukturen und der Modellierungsbasis der Referenznetze.

Die *Semantik* beschreibt die Bedeutung der Strukturelemente im Kontext der Modellierung. Basis der Modellierung ist die Struktur, die durch die Metamodelle ausgeprägt wird. Die Modellierung auf Basis der Metamodelle besteht aus folgenden *Modellierungsdomänen*:

- Modellierung der Gebäudetopologie: Bildung eines Gebäudemodells, welches die Topologie des Gebäudes inkl. Räumen, Raumübergängen und Raumfunktionsangeboten beschreibt.
- Modellierung der Nutzungsfälle: Bildung von Nutzungsfällen, die die Nutzungs-

anforderungen an Bewegungen zwischen Räumen und Funktionsnutzung beschreibt.

- Modellierung der Gebäudenutzung: Spezifikation von konkreten Nutzungsfallinstanzen durch Parametrisierung und Mengenbildung von Nutzungsfällen; Spezifikation der Initialisierung einer simulierten Gebäudenutzung.
- Verwendung des Modells der Nutzung des Gebäudes: Beschreibungen der Verwendung eines Modells zur Untersuchung der interessierenden Modellierungsgegenstände, wobei diese Ansätze Grundlagen der Verwendungsmöglichkeiten sind, die in 5.3.4 im Zusammenhang mit dem methodischen Vorgehen beschrieben werden.

Die Überführung der Anforderungen an die Modellierungsgegenstände zu einem Metamodell, welches die Modellierung in den o. g. Domänen zulässt, wird im Folgenden strukturiert beschrieben. Die Beschreibung ist in den Dimensionen der *Modellierungsgegenstände* aus 4.2 und der *Modellierungsdomänen* in folgender Tabelle 13 entsprechend dargestellt. Darauf folgen detaillierte Beschreibungen der Metamodelle in folgenden Abschnitten. Diese Beschreibungen enthalten die Spezifikation der Metamodelle auf Basis von Referenznetzen:

- 5.1.2 Metamodell der Gebäudetopologie
- 5.1.3 Metamodell der Nutzung
- 5.1.4 Metamodell des Nutzungsfalls
- 5.1.5 Metamodell der Gebäudenutzung.

Das Metamodell der Nutzung ist selbst keine Modellierungsdomäne, sondern umfasst Metamodelle für Speicher und Regelwerke, die die Nutzung formalisiert beschreiben. Diese sind das verborgene Uhrwerk, welches die „Komplikationen“ der Gebäudenutzung antreibt, also die Mechanismen realisiert wie den Zusammenhang aus Nutzungsfällen und Gebäudetopologie, aus Bewegung zwischen Räumen und Raumübergang, aus Funktionsanforderung und Funktionsangebot in seinen drei Ausprägungen. Das Uhrwerk treibt außerdem die Regelwerke der Nutzungsorientierung, Berechtigungen und Rollen an und speichert die zugehörigen Informationen. Es existiert aber keine Modellierung der Nutzung auf Basis des Metamodells der Nutzung. Modelle werden gebildet für die Gebäudetopologie, die Nutzungsfälle und die Gebäudenutzung. Sie stützen sich neben ihren eigenen Metamodellen auch auf das verborgene Uhrwerk: das Metamodell der Nutzung.

Modellierungs-gegenstand	Metamodell	Modellierung der Gebäudetopologie	Modellierung des Nutzungsfalls	Modellierung der Gebäudenutzung	Verwendung des Modells der Nutzung des Gebäudes
M O D E L L D E R G E B Ä U D E T O P O L O G I E					
Gebäudetopologie	Das Metamodell sieht vor, dass ein Modell einer Gebäudetopologie als Systemnetz modelliert wird. Weitere Elemente des Modells sind Speicher für die topologischen Informationen zur Repräsentation von Räumen, Raumübergängen und Raumfunktionen. Eine Stelle repräsentiert einen Raum, eine Transition einen Raumübergang oder ein Funktionsangebot und eine Kante die mögliche Bewegungsrichtung.	- Für die Modellierung, also die Bildung von Gebäudetopologiemodellen, besteht die Vorgabe, ein Topologie-Netz in bestimmter Ausprägung zu bilden und die Topologie und weitere gebäude-spezifische Angaben, wie Funktionsangebote, in einem Spezifikationsnetz zu modellieren. - Die Ausprägung wird durch die Definition des Topologie-Netzes festgelegt.	– <i>Die Modellierung von Nutzungsfällen ist losgelöst von der Gebäudetopologie und legt den Fokus auf Raumübergangs- und Raumnutzungsanforderungen.</i>	–	Als ein Ergebnis der Gebäudetopologie-modellierung bietet diese Methode eine Überprüfung der Gebäudestruktur aus Raumübergangs- und Raumfunktions-Beziehungen. Hierfür wird die Simulation verwendet.
Raumbezeichnungen und Raumtypisierung	Raumidentifikationen und Raumbezeichnungen werden im Gebäudemodell gespeichert. Hierbei besteht die Möglichkeit der Bildung von Begriffsklustern, z. B. für Modellierung von Raumtypen oder -oberbegriffen (jedoch ohne semantische Relation).	Die Modellierung nach dieser Methode umfasst: - Festlegung von Raumidentifikationen - Festlegung von Raumnamen, -typen, -oberbegriffen	– <i>Die Modellierungsmethode sieht eine Trennung der Modellierung von Raumübergang (Transition) und Bewegung zwischen Räumen (Raumübergangsanforderung an) vor und gibt eine Möglichkeit, Raumübergangsanforderungen mit Raumübergängen zusammenzubringen (zu matchen). Daher werden Stellen mit Raumbezeichnungen versehen, die auch in Nutzungsfällen gebäudeunabhängig zur Beschreibung der gewünschten Nutzung verwendet werden.</i>	–	Aus der Anwendung der Methode für verschiedene Gebäudemodelle kann eine Ableitung bzw. Verfeinerung einer Ontologie für Raumbezeichnungen erreicht werden, die zu einer standardisierten und damit universell verwendbaren Beschreibung von Nutzungsfällen beitragen.
Raumkapazität und -belegungszahl	Modelle, die nach dieser Methode gebildet werden, umfassen die Festlegung, dass ein Zugang zu einem Raum durch eine Raumkapazität beschränkt ist. Eine Veränderung von Raumbelegungszahlen erfolgt durch die Bewegung bzw. den Raumübergang (Transition).	Die Modellierung sieht folgende Festlegungen vor: - Raumkapazität und initiale Belegung - Raumbelegungsveränderungen (z. B. Verdopplung oder Neutralisierung in Sonderfällen)	Im Nutzungsfall kann spezifiziert werden, dass eine Veränderung von Raumkapazitäten und Raumbelegungszahl im Nutzungsverlauf erfolgen kann, z. B. zur Modellierung von Einschränkungen durch Gefahrensituationen oder große Maße des bewegten Objekts.	–	Die Verwendung des Modells zur Nutzung eines Gebäudes kann die Überprüfung von Raumbelegungen und Anpassung von Raumkapazitäten im Entwurf unterstützen.
Raumübergänge (Transitionen) und damit Verbindung von Räumen	Der Raumübergang im Modell inkludiert: - Eindeutige topologische Zuordnung zu Räumen - Transitionsidentifikation für die Zuordnung von Räumen, Übergangstypen,	Die Modellierung nach dieser Methode umfasst die Festlegung der Raumübergänge inkl. Identifikation, Zuordnung von Übergangstypen (z. B. Treppe, Tür), Zuordnung von	– <i>Die Modellierungsmethode sieht eine Trennung der Modellierung von Raumübergang (Transition) und Anforderung eines Übergangs (im Sinne</i>	–	Die Methode umfasst die Simulation, welche manuell gesteuerte Simulationsschritte zum Verständnis der Raumübergänge im Sinne Bewegung zwischen Räumen im modellierten Gebäude

Modellierungs-gegenstand	Metamodell	Modellierung der Gebäudetopologie	Modellierung des Nutzungsfalls	Modellierung der Gebäudenutzung	Verwendung des Modells der Nutzung des Gebäudes
	Barrieretypen und Berechtigungen • Transitionsinformation mit Herkunfts- und Zielraum • Speicher für die o. g. Raumbezeichnungen für Herkunfts- und Zielraum einer Transition • Raumbelungsveränderungen (Inkrement für Zielraum und Dekrement für Herkunftsraum der Transition) • Prüfung von Zugangsberechtigungen des Nutzungsfalls und Zulassung oder Verhinderung.	Barriereangaben und Zuordnung von Berechtigungen sowie topologischen Festlegungen der Vorgänger- und Nachfolgetransition einer Stelle, die einen Raum repräsentiert.	<i>Bewegung zwischen Räumen) vor.</i>		erlaubt.
• Übergangstypen	Modelle, die nach dieser Methode gebildet werden, umfassen einen Speicher für Übergangstypenbezeichnungen. Es besteht die Möglichkeit der Bildung von Begriffsklustern aus Ober-/ Unterbegriffen oder Synonymen für Elemente, z. B. Treppe, Wendeltreppe, Spindeltreppe, etc..	Die Modellierung nach dieser Methode umfasst die Festlegung von Raumübergangstypen wie Türen, Treppen, Lift, etc.	Im Nutzungsfall kann die Spezifikation von Typen erfolgen, die bei der Bewegung zwischen Räumen passiert werden können/sollen. Im Falle von Beliebigkeit oder Unbestimmtheit des Typs besteht die Möglichkeit, diese Angabe im Nutzungsfall offen zu lassen.	—	Die Verwendung des Modells zur Nutzung eines Gebäudes kann die Überprüfung der Raumübergänge hinsichtlich der geplanten Elemente und die Optimierung anhand geforderter Bedürfnisse der Nutzung unterstützen.
• Barriereangaben	Modelle, die nach dieser Methode gebildet werden, umfassen einen Speicher für Barriereangabenbezeichnungen. Es besteht die Möglichkeit der Bildung von Begriffsklustern.	Die Modellierung nach dieser Methode umfasst die Festlegung von Barrieretypen wie Barrierefreiheit, Rollstuhleignung, Barrieren, etc.	Im Nutzungsfall kann die Spezifikation von Barrieren bzw. Barrierefreiheit erfolgen. Im Falle von Beliebigkeit oder Unbestimmtheit besteht die Möglichkeit, diese Angabe im Nutzungsfall offen zu lassen.	—	Die Verwendung des Modells zur Nutzung eines Gebäudes kann die Überprüfung der Raumübergänge hinsichtlich der geplanten Elemente mit ihren Barriereangaben und die Optimierung anhand geforderter Bedürfnisse der Nutzung unterstützen.
M O D E L L D E R N U T Z U N G					
Bewegung zwischen Räumen	Das Metamodell sieht vor, dass ein Modell für einen Nutzungsfall als Raumübergangsanforderung Bewegungen zwischen Räumen mit möglichen Angaben zu den Räumen (Bezeichnungen, auch Synonyme, Ober-/ Unterbegriffe) und dem genutzten Übergang (Typ, Barriere) spezifiziert.	— <i>Die Modellierungsmethode sieht eine Trennung der Modellierung von Raumübergang (Transition) und Anforderung eines Übergangs (im Sinne Bewegung zwischen Räumen) vor.</i>	Ein Nutzungsfall spezifiziert eine Folge von Übergängen zwischen je zwei Räumen unter geforderten Rahmenbedingungen, wie z. B. Angaben zu Treppen und Anforderungen zu Barrieren bzw. Barrierefreiheit.	Die Bewegung im Rahmen der Gebäudenutzung wird als Weiterreichen eines Nutzungsfalls als Elementnetz von einer Stelle (für einen Raum) zur nächsten Stelle durch Transitionen (für einen Raumübergang) im Systemnetz (für die Gebäudetopologie) repräsentiert.	Die Methode umfasst die Simulation, welche manuell gesteuerte Simulationsschritte zum Verständnis der Raumübergänge im Sinne Bewegung zwischen Räumen im modellierten Gebäude erlaubt.

Modellierungs-gegenstand	Metamodell	Modellierung der Gebäudetopologie	Modellierung des Nutzungsfalls	Modellierung der Gebäudenutzung	Verwendung des Modells der Nutzung des Gebäudes
Gebäude- bzw. Raumfunktions-nutzung	Das Metamodell für Raumfunktionen umfasst folgende Elemente: • Speicher für Funktionsnamen mit Raumzuordnung • Speicher für Nutzungsszenarien aus Raum, Funktion und Rollen der Nutzer • Steuerungslogik für Nutzungsarten der gemeinsamen Nutzung: joined Use und joined Team Use.	Die Modellierung sieht eine Festlegung von Funktionen pro Raum vor.	Es bestehen zwei Arten der Funktionsnutzung: • Benennung einer singular genutzten Funktion • Funktionsnutzung zusammen mit anderen Beteiligten, die entweder beliebige Rollen haben (joined Use) oder Mitglieder eines vordefinierten Teams mit möglicherweise verschiedenen Rollen sind (joined Team Use)	Die Gebäudenutzung erfordert eine initiale Festlegung der Nutzungsszenarien (Raum, Funktion, Rolle) bzw. der Initiierung der Funktionen eines Raums. Die Funktion kann eine einfache durch einen Nutzer verwendbare Funktion oder gemeinsam durch mehrere Nutzer zu nutzende Funktion sein.	Die Methode umfasst die Simulation, welche manuell gesteuerte Simulationsschritte zum Verständnis der Raumfunktionsnutzung im modellierten Gebäude erlaubt.
Zugangs-berechtigungen	Modelle, die nach dieser Methode gebildet werden, umfassen folgende Elemente: • Zugangsberechtigung heißt, Erlaubnis zur Bewegungsnutzung einer Transition • Die Prüfung der Zugangsberechtigung ist Rollen-basiert und/oder Nutzungsfall-basiert. • Speicher für die Erlaubnis einer Rolle oder eines Nutzungsfalls.	Die Modellierung nach dieser Methode umfasst: • die Festlegung der Zugangsberechtigungen zu Räumen • die Festlegung der Veränderung von Zugangsberechtigung bei Gebäudenutzung. Beides kann rollen- oder Nutzungsfall-bezogen sein.	Im Nutzungsfall kann die Festlegung der Veränderung von Zugangsberechtigungen bei Gebäudenutzung erfolgen. Dies kann rollen- oder Nutzungsfall-bezogen sein.	Für die Gebäudenutzung kann festgelegt werden: • Veränderung von Zugangsberechtigungen bei Gebäudenutzung. • Die Rollen bezogene Berechtigungsveränderung kann immer geltend festgelegt sein. Die Nutzungsfall-bezogene Berechtigungsveränderung ist abhängig vom Nutzungsfall.	Die Methode umfasst die Simulation, welche manuell gesteuerte Simulationsschritte zur Überprüfung des Zusammenspiels von Zugangsberechtigungen und Barrieren umfasst, z. B. öffentlicher Zugang über Treppe, barrierefreier Zugang nicht (immer) öffentlich.
M O D E L L D E S N U T Z U N G S F A L L S					
Nutzungsfall, Eigner ist Nutzer	Das Metamodell unterstützt die Modellierung von Nutzungsfällen folgendermaßen: • Eine Stelle repräsentiert einen Raum, eine Transition eine Raumübergangs- oder eine Funktionsnutzungsanforderung und eine Kante die gewünschte Bewegungsrichtung. • Raumnutzungsdefinition für drei modellierbare Nutzungsarten: Einzel-Nutzung, joined Use und joined Team Use • Bewegungsdefinition mit Information zur Bewegung vom Herkunfts- zum Zielraum mit Anforderungen an Barriereangabe und Übergangstyp • Modellierungsvorschrift für die Bildung von Abfolgen	– <i>Die Modellierung von Nutzungsfällen ist losgelöst von der Gebäudetopologie.</i>	Die Modellierung des Nutzungsfalls besteht in der geforderten Nutzung der Funktionen von Räumen und der geforderten Bewegungen hin zu den Räumen (Raumübergangsanforderung), die diese Funktionen anbieten. Der Fokus der Nutzungsfallmodellierung liegt auf dieser Anforderungsspezifikation, auch in Unkenntnis der tatsächlichen Gebäudetopologie Die Nutzungsausprägung, d. h., ob ein Nutzungsfall bewegungs- oder funktionsorientiert oder neutral ist, kann pro Nutzungsfall bestimmt werden.	Für die Modellierung der Gebäudenutzung sind Nutzungsfälle mit gleichen oder unterschiedlichen Rollen und Nutzungsausprägung in beliebiger Anzahl in der Nutzung eines Gebäudes modellierbar. Dadurch ist die Repräsentation verschiedener Nutzerrollen in der Modellierung einer Gebäudenutzung möglich.	Die Methode umfasst die Simulation, welche manuell gesteuerte Simulationsschritte zur anschaulichen Überprüfung des Nutzungsablaufs gemäß Nutzungsfällen umfasst. Dies erlaubt das Erkennen von unerwünschten Abläufen bzw. Reihenfolgen oder Situationen wie Blockaden, endlosen Wartezuständen oder Kooperationsmängeln bei der gemeinsamen Nutzung von Raumfunktionen. Für die Nutzungsausprägung der modellierten Nutzungsfälle kann deutlich werden, dass die Gebäudetopologie der Ausprägung angepasst werden sollte, z. B. die Anordnung von

Modellierungs-gegenstand	Metamodell	Modellierung der Gebäudetopologie	Modellierung des Nutzungsfalls	Modellierung der Gebäudenutzung	Verwendung des Modells der Nutzung des Gebäudes
	aus Bewegung zwischen Räumen und Nutzung der Raumfunktionen - Vorgabe der Nutzungsausprägung (bewegungs-/funktionsorientiert) für jeden Nutzungsfall - Speicher für die Rolle des Nutzers, also Eigner des Nutzungsfalls.				Funktionsangeboten im Fall überwiegend funktionsorientierter Nutzungsfälle. Ursachen für diese Situationen, die in Inkompatibilität zwischen Nutzungsfall und Gebäudetopologie liegen, sind dadurch leichter lokalisierbar.
Nutzungsfall-identifikation	Modelle, die nach dieser Methode gebildet werden, verfügen über einen Speicher für die Nutzungsfall-identifikation. Dieser ist erforderlich für: - Lokalisation eines Nutzungsfalls in der Gebäudetopologie bei der Simulation der Gebäudenutzung - Berechtigungsprüfung auf Nutzungsfall-Ebene bei Raumübergang.	Bei der Modellierung der Gebäudetopologie wird die Festlegung von Zugangsberechtigungen (Übergangsverbote) für bestimmte Nutzungsfälle, und dadurch für mit ihnen verbundenen Eignern unterstützt.	—	Eine Modellierung von Nutzungsfall-bezogenen Veränderungen während der Gebäudenutzung wird unterstützt, z. B. Raumzugangs- (also Übergangs-) Berechtigung für einen Nutzungsfall, um bspw. zu modellieren, dass ein Verlassen eines Gebäudeteils im Verlaufe der Gebäudenutzung erst nach Freischaltung wieder möglich ist (Beispiel Parkhaus: Einfahrt, Bezahlen, Ausfahrt).	—
Ablauf der Nutzung von Funktionen	Das Metamodell sieht vor, dass Modelle von Nutzungsfällen im Elementnetz eines Nutzungsfalls über eine Teilmenge an Stellen verfügen, die den Zustand der Funktionsnutzung markieren und zur Spezifikation der Bewegungssteuerung (Raumübergänge) herangezogen werden können.	—	Die im Nutzungsfall spezifizierte Folge von Raumübergängen kann um eine Abfolge von Funktionsnutzungsanforderungen ergänzt werden. Der Zustand wird durch Transitionen gesetzt und kann für Raumübergangstransitionen abgefragt werden, wodurch die Raumübergangsanforderung in Abhängigkeit der Nutzung spezifiziert werden kann.	Die Spezifikation der Nutzungsabfolge im Nutzungsfall ist relevant für die Abbildung einer Reihenfolge aus Raumübergängen und Funktionsnutzungen, insbesondere bei der kooperativen Gebäudenutzung, also durch mehrere kooperierende Nutzungsfälle.	In der Analyse von kooperativer Gebäudenutzung ist die Funktionsnutzungsabfolge jedes Nutzungsfalls interessant für die Bewertung der Unterstützung von angeforderten Funktionsangeboten durch die Gebäudetopologie und insbesondere die Anordnung von Funktionsangeboten im Gebäude.
Nutzerrollen	Modelle, die nach dieser Methode gebildet werden, verfügen über: - einen Speicher für die Zuordnung von Nutzerrollenbezeichnungen zu Raumübergängen - einen Speicher für die Zuordnung Raum, Funktion, Rolle für joined Team Use.	Die Modellierung nach dieser Methode umfasst: - die Festlegung von Nutzerrollen - die Festlegung von Zugangsberechtigungen (Übergangsverbote) für bestimmte Nutzerrollen, d. h. bestimmte Eigner von Nutzungsfallen	—	Eine Modellierung von Szenarien der gemeinsamen Rollen-basierenden Funktionsnutzung (joined Team Use) wird unterstützt. Eine Modellierung von Rollen-bezogenen Veränderungen während der Gebäudenutzung wird ermöglicht, z. B. Raumzugangs-, also Übergangsberechtigung für Nutzungsfälle einer Rolle, um bspw. zu modellieren, dass bestimmte Nutzer im Verlaufe der Gebäudenutzung zugangsbeschränkt werden.	Aus der Simulation der Gebäudenutzung wird deutlich, welche Rollen zu welchen Zugangs- und Nutzungsberechtigungen führen. Insbesondere werden Zusammenhänge zwischen Gebäudetopologie und Berechtigungen für Nutzungsfälle und die Auswirkung auf eine kooperative Nutzung aufgrund der zugeordneten Rollen sichtbar.

Modellierungs-gegenstand	Metamodell	Modellierung der Gebäudetopologie	Modellierung des Nutzungsfalls	Modellierung der Gebäudenutzung	Verwendung des Modells der Nutzung des Gebäudes
M O D E L L D E R G E B Ä U D E N U T Z U N G					
Verbindung von der Bewegung zwischen Räumen und dem Raumübergang sowie von Raumfunktionsnutzungsanforderung und Raumfunktionsangebot	Die Modellierungsmethode bietet ein Metamodell an, das die Zusammenführung durch Unifikation folgender Elemente realisiert: • der Transaktionsinformation von Raumübergang und Nutzungsfall-Raumübergangsanforderung sowie • von Raumfunktionsinformation.	–	–	–	–

Tabelle 13: Modellierungsgegenstand — Metamodellbildung und Modellierung

Die genannte Zugangsberechtigung kann genutzt werden, um die Nutzungsberechtigung des Raums und damit der von ihm angebotenen Funktionen zu modellieren. Wie in Tabelle 13 beschrieben, können zwei Arten von Zugangsberechtigungen modelliert werden, die vom Metamodell angelegt sind: für eine Nutzerrolle und damit alle Nutzungsfälle, die diese Rolle haben, oder für einen individuellen Nutzungsfall. Die Vergabe der Zugangsberechtigung kann in zwei Modellen modelliert werden: im Gebäudetopologiemodell oder im Nutzungsfallmodell. Tabelle 14 gibt Beispiele für Anwendungen dieser Modellierungsmöglichkeit.

Festlegung ...	im Gebäudemodell	bzw. Steuerung durch Nutzungsfall
für Nutzerrolle	• Privathaus: Zugang für Bewohner differenzieren und für „Reinigungskraft“ beschränken • Parkhaus: Parkplatzsorten, Nebenzugang für Ticketbesitzer • Büro: Raumzugang für Firmenangehörige, Zugang zu Funktionsräumen (Labor, Sicherheitszone, IT, Post)	• Büro: Sperrung Tiefgarage, Kantinenschließung, Ausfall Aufzug
für individuellen Nutzungsfall	• Privathaus: Raum nur einmal pro Nutzungsfall „Reinigung“ betreten • Parkhaus: Einfahrt, Ticket ziehen und Ausfahrt sperren, Ticket zahlen und Ausfahrt freischalten	• Parkhaus: Parkticket verlieren; individuell freischalten • Büro: Dienstausweis verlieren, sich aussperren

Tabelle 14: Zugangsberechtigung: Beispiele für Anwendungen

5.1.1 Metamodell Rahmenwerk und Spezifikation

Grundlage der Bildung von Gebäudemodellen sind Entitäten und Regelwerke, die die Gebäudetopologie und Gebäudenutzung definieren. Durch die Beschreibungsmittel der Referenznetze (Syntax) und deren Semantik werden diese Entitäten und Regelwerke definiert. Auf diese Entitäten und Regelwerke bauen die Modellierungsgegenstände auf. Die Definitionen sind zusammengefasst in einem Rahmenwerk und in einer Festlegung der Spezifikationsmittel für Gebäudemodelle.

Neben der topologischen Definition in einem Topologie-Netz, wie in 5.1.2 erklärt, gibt es weitere zu repräsentierende Modellierungsgegenstände, die im *Rahmenwerk* definiert sind. Das Rahmenwerk besteht aus unverbundenen Referenznetzen. Die Referenznetze repräsentieren Regelwerke und Entitäten als Grundlage von Modellen. Zu unterscheiden sind Repräsentationen für:

- Gebäudetopologie, siehe 5.1.2
- Nutzung, insbesondere Funktionsnutzung, siehe 5.1.3
- Nutzungsfall, siehe 5.1.4
- Gebäudenutzung mit Raumübergangslogik, siehe 5.1.5.

Jedes Gebäudemodell erfordert eine *Spezifikation*. Die abgeschlossene Beschreibung des Gebäudetopologiemodells ist notwendige Voraussetzung für die Verwendung des Modells der Gebäudenutzung. Das *Spezifikationsnetz* ist eine Sammlung von Referenznetzen und enthält für ein Gebäude die Spezifikationen zu den Modellierungsgegenständen. Dazu zählen:

- Strukturangaben der Topologie, wie explizit gemachte Beziehung zwischen Raum-Stellen und Raum-Transitionen für die Regelwerke für Raumübergänge; Angaben zu Raumbezeichnungen, Raumkapazitäten, Raumübergangstypen und Barriereangaben
- Angaben für die Nutzung, wie die Benennung von Funktionen, die ein Raum anbietet
- Zugangsberechtigungen für die Nutzung.

Rahmenwerk und Spezifikationsnetz sind Teile des Metamodells, deren Bestandteile in folgenden Abschnitten beschrieben werden.

5.1.2 Metamodell der Gebäudetopologie

Das Modell einer Gebäudetopologie geht von folgenden Annahmen aus:

1. Das Metamodell wird, wie in Tabelle 13 beschrieben, für alle Modellierungsgegenstände zum Sammelbegriff Gebäudetopologie ausgeprägt.
2. Für die Erklärung des Metamodells wird Bezug zur Modellierung eines Gebäudes genommen. Hierdurch wird deutlich, welche Elemente das Metamodell erfordert.
3. Der Entwurf eines Modells einer Gebäudetopologie wird anhand von Beispielen und besonderen Objekten einer Gebäudetopologie erörtert. Entscheidungshilfen für die Modellierung werden gegeben.

Anknüpfend an die Definitionen in 4.2 und die Festlegung der Modellierungsbasis in 4.4.4 insbesondere Tabellen 10 und 11, ist die Idee, eine Gebäudetopologie als Struktur aus Räumen und Übergängen zwischen diesen aufzufassen und ein Modell als Referenznetz zu bilden, in dem jeder Raum durch eine Stelle, die sogenannte *Raum-Stelle*, und jeder Raumübergang durch eine Transition, die sogenannte *Raumübergangstransition* repräsentiert wird. Zusätzlich werden Funktionen eines Raums als *Raumfunktionstransitionen* repräsentiert. Diese Elemente werden im Folgenden definiert.

Eine Gebäudetopologie wird aus Referenznetzen modelliert. Ein Modell der Gebäudetopologie wird als *Referenznetz der Gebäudetopologie*, kurz *Gebäudetopologie-Netz*, repräsentiert und besteht aus folgenden Referenznetzen:

- Das für jedes Gebäudemodell spezifische *Topologie-Netz* ist ein Referenznetz, welches die modellierte Topologie eines Gebäudes aus Stellen für Räume und Transitionen für die

Raumübergänge repräsentiert. Das Topologie-Netz hat die einzige Aufgabe, die Zusammenhänge zwischen Räumen und Raumübergängen durch Kanten für Bewegungsrichtungen sowie Funktionsangebote von Räumen als Referenznetz zu beschreiben. Es fungiert in der später näher beschriebenen Modellierung der Gebäudenutzung als Systemnetz, welches die Bewegungen entlang Transitionen sowie die Nutzungen im Gebäude modelliert. Das Topologie-Netz hat, wie alle Referenznetze, eine Repräsentation als Graph-Diagramm.

- Das in 5.1.1 genannte *Rahmenwerk*, welches Referenznetze zur Repräsentation grundlegender Entitäten und Regelwerke einer Gebäudetopologie umfasst.
- Das *Spezifikationsnetz*, wie in 5.1.1 erläutert, umfasst eine abschließende Spezifikation eines Gebäudemodells.

Bestandteile des Topologie-Netzes sind Raum-Stellen, Raumübergangs- und Raumfunktionstransitionen sowie Kanten.

Eine *Raum-Stelle* repräsentiert einen Raum, laut Begriffsbestimmung in 3.3 auch Raumabschnitte bis hin zu Gebäudeteilen je nach Abstraktion. Zwei Stellen sind verbunden über mindestens eine Transition für einen Raumübergang, die sog. *Raumübergangstransition*, mit *gleichgerichteten Kanten*, die die Bewegungsrichtung vom Herkunftsraum (*Raum-Stelle*) in den Zielraum (*Raum-Stelle*) über diesen Raumübergang (*Raumübergangstransition*) repräsentieren.

Jede Raum-Stelle erhält bei der Modellierung einer Gebäudetopologie eine *Raumidentifikation*, die als Bezeichnung vom Typ einer Zeichenkette (String) vergeben wird. Einer Raum-Stelle sind Eigenschaften zugeordnet. Für die Zuordnung ist die eindeutige Einordnung der Stellen in die Gebäudetopologie erforderlich. Diese Einordnung erfolgt über die Darstellung ihrer topologischen Beziehung zur benachbarten Transition. Als Modellierungsmittel stellt das Rahmenwerk das *Room Place Definitions Memory* bereit. Der Speicher besteht aus zwei Mengen: (a) *Room Place succeeding a Transition* und (b) *Room Place preceding a Transition*. (a) enthält die Raum-Stelle, die einer Raumübergangstransition folgt, d. h. zwischen jeder Transition und Stelle aus (a) verläuft eine gerichtete Kante von der Transition zur Stelle. (b) enthält die Raum-Stelle, die einer Raumübergangstransition vorausgeht, d. h. zwischen jeder Transition und Stelle aus (b) verläuft eine gerichtete Kante von der Stelle zur Transition.

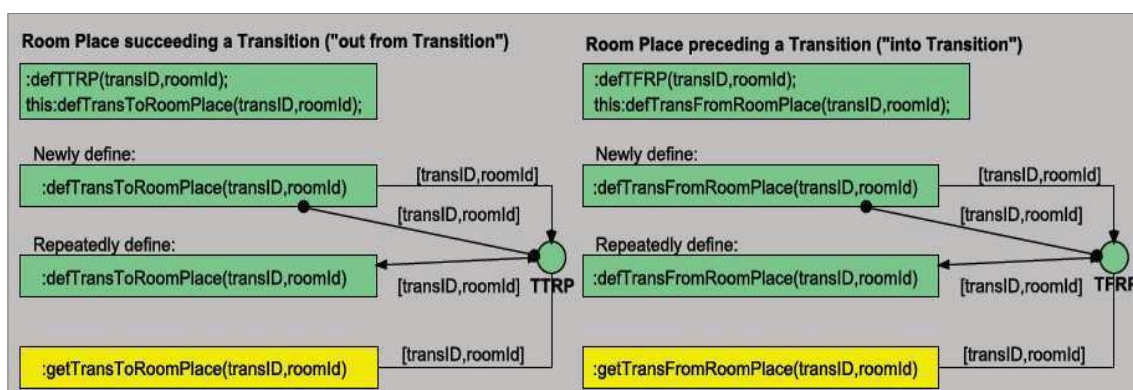


Abbildung 4: Speicher Room Place Definitions Memory

Der Übergang in einen Raum ist abhängig von der Raumkapazität. Daher ist in diesem Metamodell vorgesehen, dass eine Abfrage der Raumbelegung in der Raumtransitionslogik erfolgt. Dazu muss die Raum-Stelle des Zielraums identifiziert und deren Raumkapazität in die Logik eingehen. Das

Rahmenwerk enthält zwei Speicher: Für die *Raumkapazität* das *Room Capacity Memory* und für die *Raumbelegung* das *Room Allocation Memory (RAM)*. Beide Zähler können initial gesetzt, erhöht und vermindert werden. Für das RAM wird durch die Transitionslogik der Zähler bei Raumzutritt erhöht und beim Verlassen vermindert. Es ist aber in beiden Fällen möglich, dass durch einen Nutzungsfall beide Zähler gemäß der Anforderung des Nutzungsfalls angepasst werden können. Ein Beispiel ist die Modellierung von Platz bedürftiger Nutzung, z. B. durch zweifaches Hochzählen des RAM bei einer Person mit ständiger Begleitperson, oder die Reduktion der Kapazität aufgrund einer simulierten Gefahrensituation und verbundenen Zutrittseinschränkung während der Gebäude-nutzung.

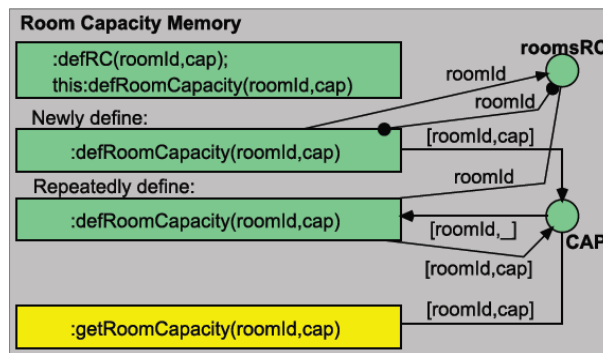


Abbildung 5: Speicher Room Capacity Memory

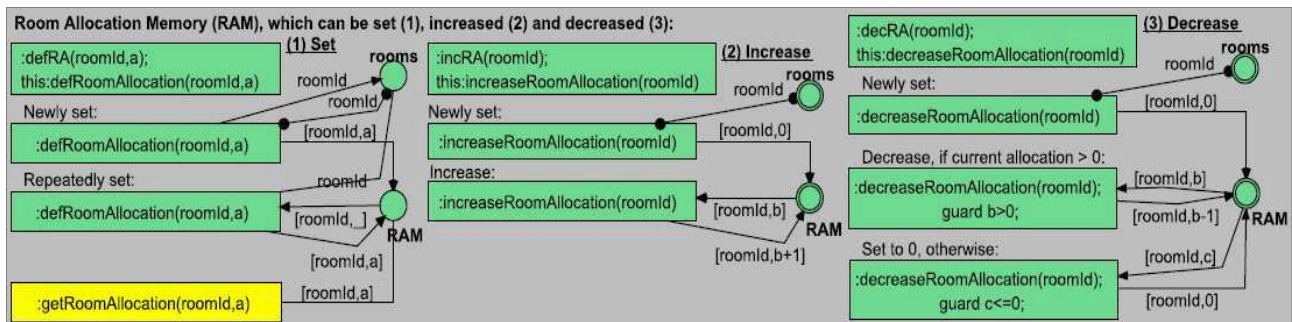


Abbildung 6: Speicher Room Allocation Memory

Das Modell der Gebäudenutzung basiert auf den dynamischen Eigenschaften von Petrinetzen, d. h. dem Schalten von Transitionen und dem Transport von Objekten von Stelle zu Stelle. Das Meta-modell sieht vor, und so wird es in 5.1.5 erklärt, dass Nutzungsfälle durch Elementnetze repräsentiert werden und diese die bewegten Objekte sind. Die korrekte Darstellung der Gebäudenutzung erfordert die explizite Information über die Belegung von Stellen durch Nutzungsfall-Elementnetze. Der Speicher *Current Room Place of Usecase* verwaltet diese Information. Ausgewertet wird diese Information etwa bei der Nutzung der durch den Nutzungsfall in einem Raum angeforderten Raumfunktion. Dazu muss im ersten Schritt die Raum-Stelle ermittelt werden.

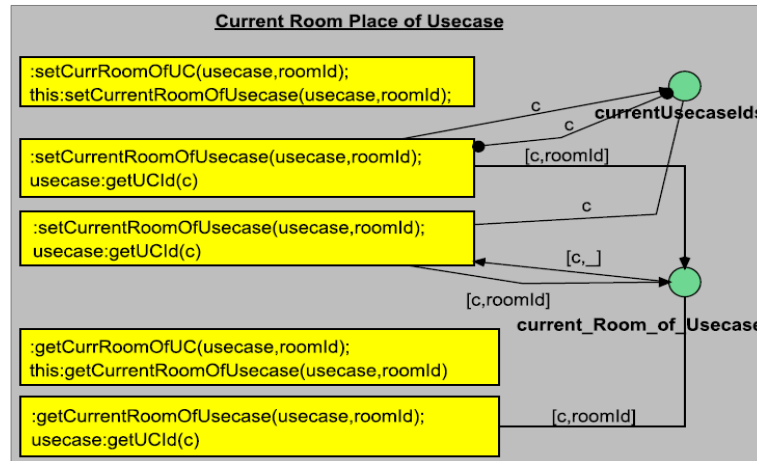


Abbildung 7: Speicher Current Room Place of Usecase

Weiterer Bestandteil des Topologie-Netzes ist die Transition. Eine Transition repräsentiert einen Raumübergang oder eine Raumfunktion.

Ein Raum mit beliebigen Funktionsangeboten wird repräsentiert durch eine Stelle mit einer durch eine bidirektionale Kante verbundenen Transition, die als *Raumfunktionstransition* bezeichnet wird und die als Beschriftung $u.useFunction()$, einen synchronen Kanal zum Nutzungsfall u , trägt. Im Vorgriff auf die Beschreibungen der Modelle der Nutzung und des Nutzungsfalls sei an dieser Stelle kurz begründet, warum eine Repräsentation als Transition gewählt wird: Die Transition an der Raum-Stelle führt zu keiner Veränderung der Raum-Stellen-Belegung im Topologie-Netz. Die Repräsentation ist aber im Zusammenhang mit dem Modell der Nutzung schlüssig, weil die dort verankerte Synchronisation zwischen Funktionsangebot im Topologie-Netz und der Funktionsnutzung im Nutzungsfall zu einer Veränderung des Nutzungsfallzustandes führt. Daher entspricht diese Wahl der Intention von Transitionen in Petrinetzen. Welche Funktion *angeboten* wird, ist nicht im Topologie-Netz, sondern im Spezifikationsnetz des Gebäudemodells definiert. Und welche Funktion *genutzt werden soll*, ist im Nutzungsfall spezifiziert. Das Topologie-Netz repräsentiert in diesem Metamodell die *Verortung* eines — wie auch immer ausgeprägten — Funktionsangebots in einem bestimmten Raum. Dadurch sind die Modellierungsaspekte trennscharf auf die Modellierungsgegenstände Gebäudetopologie („Verortung“), Nutzungsfall („Nutzungsanforderung“) und Nutzungsspezifikation („Funktionsangebot“, siehe 5.1.3) bezogen.

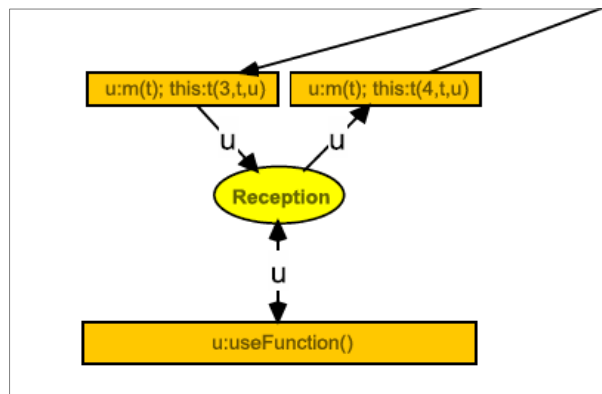


Abbildung 8: Raumfunktionstransition, Beispiel

Für einen Raumübergang repräsentiert eine sogenannte *Raumübergangstransition* den gerichteten Übergang zwischen genau zwei Räumen, die als Raum-Stellen modelliert sind. Die Richtung wird durch zwei gleichgerichtete Kanten von einem Herkunftsraum (Raum-Stelle) zur Raumübergangstransition und von dieser zum Zielraum (Raum-Stelle) modelliert. Die Wahl einer Transition zur Repräsentation eines Raumübergangs zwischen zwei Räumen, die ihrerseits durch Stellen repräsentiert werden, entspricht der Intention von Transitionen und Stellen in Petrinetzen, wenn man Raumbelegungen als Zustände einer Gebäudetopologie auffasst. Interessant ist die Fragestellung, wie besondere Objekte der Gebäudetopologie repräsentiert werden. Dies wird am Ende dieses Abschnitts 5.1.2 erörtert.

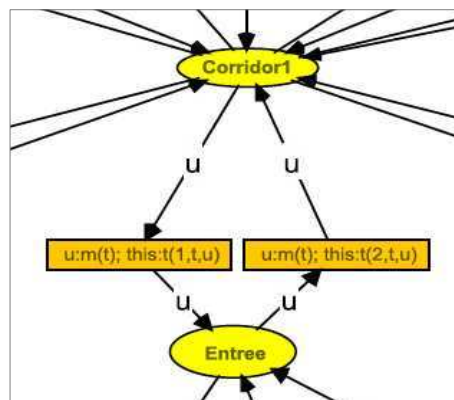


Abbildung 9: Raumübergangstransitionen, Beispiel

Einer Transition sind Eigenschaften zugeordnet. Die Eigenschaften des Raumübergangs werden als Parameter des Synchronisationskanals *transition*, abgekürzt *t*, der Transition spezifiziert. Im Topologie-Netz des *Gebäudetopologie-Netzes* wird anstelle *transition(id,t,u)* die abgekürzte Notation *t(id,t,u)* verwendet, wobei *id* die Transitionsidentifikation bezeichnet und eine ganze Zahl ist, der *Parameter t* die Transitionsinformation und *u* der Nutzungsfall ist, wie im Folgenden genauer beschrieben.

Jeder Transition wird eine *Transitionsidentifikation* zugeordnet, die als Parameter an erster Stelle des Synchronisationskanals auftritt; im Beispiel in Abbildung 9 sind es die Nummern „1“ und „2“. Über diese Identifikation können die Transitionsinformationen eindeutig der Transition zugeordnet werden.

Ein Parameter *Transitionsinformation*, an zweiter Stelle des Synchronisationskanals *t*, umfasst die Eigenschaften der Transition, die Herkunfts- und Zielraum verbindet. Die Transitionsinformation ist ein Tupel der Form *[from, barrier, type, to]*, wobei *from* und *to* für die Bezeichnung des Herkunfts- bzw. Zielraums steht und *barrier* für die Barriereangabe und *type* für den Übergangstyp. Die Bezeichnungen werden in Speichern verwaltet, die zusammenfassend im Rahmenwerk als *Room Transition Definitions Memory* benannt sind. Zu einer Transition können 1 bis *n* Bezeichnungen des *Herkunftsraums* (*from*) und 1 bis *m* Bezeichnungen des *Zielraums* (*to*) zugeordnet werden. Ebenso können 1 bis *p* Bezeichnungen für *Barriereangaben* und 1 bis *q* Bezeichnungen für *Übergangstypen* zugeordnet werden. Dadurch ist es möglich, *Synonyme und Ober- wie Unterbegriffe aus einer Ontologie* für Raumbezeichnungen, Übergangstypen und Barriereangaben als Transitionsinformation zu repräsentieren. Die Raumbezeichnungen sind nicht die o. g. Raumidentifikationen, die den Raum-Stellen zugeordnet sind. Die Bezeichnungen dienen nur der Verwendung in der Gebäudenutzung, wenn Transition und Nutzungsfall verbunden werden. Dies wird in 5.1.5 erklärt.

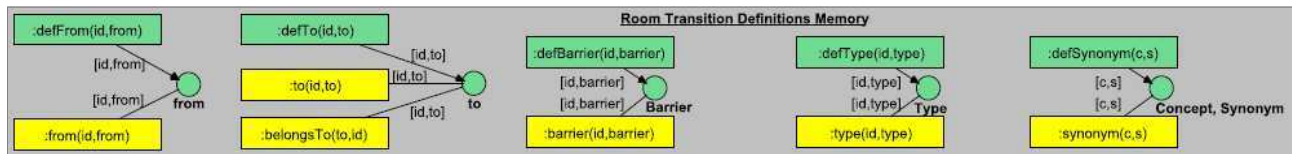


Abbildung 10: Speicher Room Transition Definitions Memory

Der Synchronisationskanal der Transition kann einen dritten Parameter enthalten, der den Nutzungsfall, genauer eine Referenz auf das Elementnetz des Nutzungsfalls, repräsentiert. Dieser Parameter ist dann für die Logik der Gebäudenutzung erforderlich, wenn Informationen des Nutzungsfalls in die Transitionslogik im Rahmen der Gebäudenutzung aufgenommen werden sollen.

Die Definition der konkreten Raumbezeichnungen, Raumkapazität, Raumbelegung, Übergangstypen und Barriereangaben für ein Gebäudetopologiemodell erfolgt im Spezifikationsnetz. Hierfür sind die Referenznetze von *Room Transition and Room Use Definitions of the Building*, *Room Transition Type Definitions*, *Room Transition Barrier Definitions* und eine Synonymdefinition im Spezifikationsnetz angelegt, die diese Definitionen realisieren.

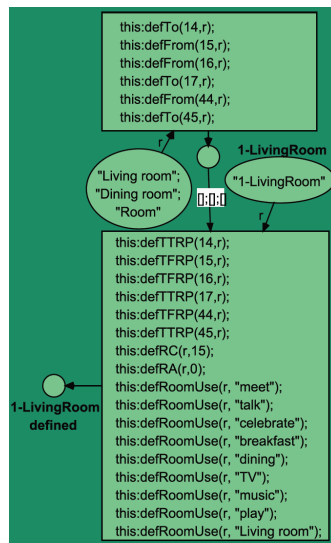


Abbildung 11: Room Transition and Room Use Definitions of the Building, Beispiel

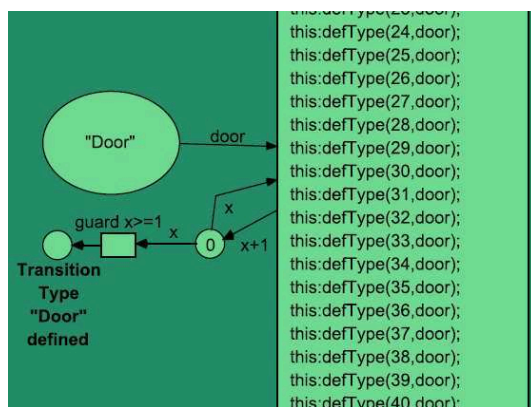


Abbildung 12: Room Transition Type Definitions, Beispiel, Ausschnitt

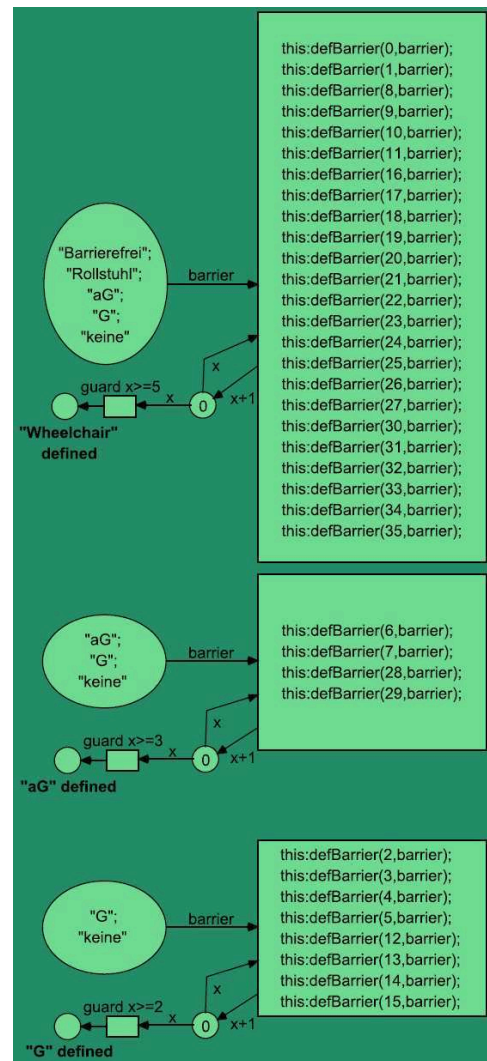


Abbildung 13: Room Transition Barrier Definitions, Beispiele

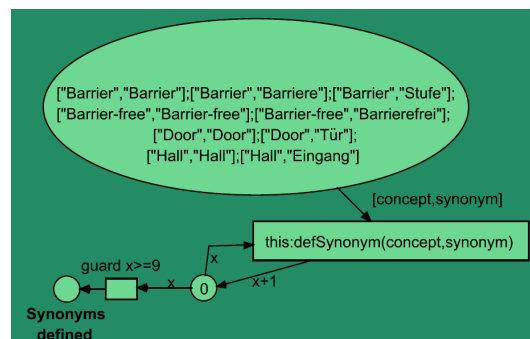


Abbildung 14: Synonym Definitions, Beispiel

Im Topologie-Netz des *Gebäudetopologie-Netzes* wird anstelle *transition(id,t,u)* die abgekürzte Notation *t(id,t,u)* verwendet, wobei *id* die Transitionsidentifikation bezeichnet und eine ganze Zahl ist, der *Parameter t* die Transitionsinformation und *u* der Nutzungsfall ist. Die Parameter *t* und *u* werden im Topologie-Netz nicht durch den Modellierer instanziiert, sondern haben ihre Bedeutung in der Gebäudenutzung, wenn die Transitionsinformation *t* der Bewegung⁴¹ des Nutzungsfalls *u* mit dem Parameter *t* der Übergangstransition vereinheitlicht (unifiziert) wird, wie in 5.1.5 erläutert.

Eine interessante Fragestellung ist die nach der Repräsentation besonderer Objekte der Gebäudetopologie. Es ist leicht zu erkennen, dass zwei Räume, die durch eine Tür verbunden sind, als zwei Raum-Stellen und die Tür als Transition repräsentiert werden. Die Repräsentation einer Rolltreppe als Übergangstransition kann auch nachvollzogen werden. Wie aber ist ein Aufzug zu modellieren: als Raum-Stelle oder Übergangstransition? Im Folgenden werden Entscheidungshilfen für die Modellierung gegeben. Die resultierende Repräsentation passt zur Einordnung der besonderen Objekte in den IFC, wie in 5.2 weiter ausgeführt. Diese Deckung ist zu beachten, um eine Abbildung zwischen einem Topologie-Modell und einem durch IFC spezifizierten BIM-Modell zu ermöglichen.

Die Beantwortung der Frage nach den Eigenschaften des zu repräsentierenden Objekts unterstützt die Einordnung des Objekts als Raum oder als Raumübergang. Dabei werden die Eigenschaften aus der Perspektive der getroffenen Modelldefinitionen beschrieben, d. h. der Elemente des Gebäudetopologiemodells, wie Raum-Stellen und Raumübergangstransitionen. Es gibt mindestens ein Beispiel, das zeigt, dass die Eigenschaften nicht alleine für die eindeutige Zuordnung der Repräsentation als Raum-Stelle oder Raumübergangstransition ausreichen, wie später erklärt.

Objekte, welche durch Raum-Stellen modelliert werden sollten, lassen sich durch Vorliegen folgender Eigenschaften charakterisieren. Es handelt sich um raumartige Objekte.

- Das Vorhandensein einer *Kapazität* beeinflusst die Nutzung des Objektes der Gebäudetopologie und sollte daher im Modell repräsentiert werden.
- *Verweilen* und eine damit verbundene *Belegung* des Objektes ist charakteristisch für seine Nutzung, insbesondere von ihm angebotener Funktionen.
- Zur Nutzung wird das Objekt betreten oder verlassen: *Ein- und Austreten* ist eine Eigenschaft, die mit seiner Nutzung verbunden ist.
- Eine *Bewegung im Objekt im Rahmen der Nutzung* von Funktionsangeboten ist eine charakteristische Eigenschaft. Sie wird in dem Gebäudetopologiemodell durch eine Raum-Stelle nicht modelliert, könnte aber durch Modellierung mehrerer Raumabschnitte durch mehrere Raum-Stellen modelliert werden. Modelliert werden die Funktionsangebote.

Ein Objekt, das als Raumübergang anhand des Vorliegens folgender Eigenschaften eingeordnet werden kann, wird durch eine oder mehrere Raumübergangstransitionen repräsentiert.

- Wesentliche Eigenschaft ist die *Verbindung* zweier Räume.
- Die Verbindung ist mit *Bewegung in der Nutzung* verbunden, dem Raumübergang.
- Die Verbindung der Räume hat selbst keine Kapazität, sondern einen reinen Durchsatz; d. h., im Modell wird dies durch die Raumübergangstransition repräsentiert mit einem *sofortigen Übergang* von einer Raum-Stelle über die eingehende Kante und weiter zu einer Raum-Stelle über die ausgehende Kante.
- Der Raumübergang ist anschaulich *kein geschlossener Raum*, der als solcher die oben genannten Eigenschaften hat.

⁴¹ Genauer ist die Bezeichnung Raumübergangsanforderung.

Die Tabelle 15 listet Vertreter besonderer Objekte der Gebäudetopologie beispielhaft auf, beschreibt ihre Eigenschaften und ordnet sie raumartigen oder raumübergangsartigen Objekten zu. Es wird auf die Abbildung 15 verwiesen, die zu diesen Beispielen Ausschnitte von Gebäudetopologiemodellen Grundrissausschnitten zuordnet. Vertreter mit Nr. (i) zeigt einen Flur, der als Raum eingeordnet und als Raum-Stelle im Modell repräsentiert wird. Nr. (ii) zeigt, dass ein Gebäudetopologiemodell verändert werden muss, wenn mit der Modellierungsmethode bis auf diese Detailebene eine Repräsentation erreicht werden soll. Das Öffnen der mobilen Wand wird repräsentiert durch Entfallen der markierten Raumübergangstransitionen und der Raum-Stelle. Nr. (iii) zeigt, dass ein Raum mit variabler Kapazität keine Änderung des Topologie-Netzes bedeutet. Diese Änderung erfolgt im Spezifikationsnetz und ist während der Nutzung möglich und auch so modellierbar. Die Aufzugsanlage in Nr. (iv) wird zusammen mit Beispiel Nr. (viii) besprochen. Es handelt sich um einen mehrdeutigen Vertreter. Nr. (v) zeigt zwei Fahrtreppen, die beide ein Geschoss mit einem höher gelegenen Geschoss verbinden, wobei die rechts dargestellte aufwärts und die links dargestellte abwärts befördert. Im Topologie-Ausschnitt repräsentieren Raumübergangstransitionen die Fahrtreppen, wobei die gerichteten Kanten die möglichen Bewegungsrichtungen der Nutzung beschreiben. Nr. (vi) zeigt das interessante Beispiel eines Fahrsteigs, wie man ihn in langen Flughafengängen findet. Der Topologie-Ausschnitt Nr. (vi.i) zeigt ein Modell, in dem der Gang als Raum-Stelle repräsentiert wird, der über die weiß gehaltenen Raumübergangstransitionen von anderen Gebäudebereichen betreten und verlassen werden kann. Die markierte Raumübergangstransition repräsentiert den Fahrsteig, der nur eine Bewegung in diesem Gang unterstützt. Daher ist die Transition nur mit der Raum-Stelle verbunden, die den Gang repräsentiert. Soll eine Positionsänderung im Gang durch Bewegung mit dem Fahrsteig repräsentiert werden, muss der Gang in Raumabschnitte im Topologie-Modell unterteilt werden, wie in Nr. (vi.ii) dargestellt. Die Repräsentation des Gangs wird ergänzt um einen Vor- und einen Nachbereich des Fahrsteigs. Der Vorbereich kann vom Gang aus betreten und auch wieder verlassen werden. Das Verlassen ist eine denkbare Möglichkeit und nur eine Frage der Anforderung. Der Nachbereich kann nur zum Gang hin verlassen werden. Mit dieser Repräsentation kann man modellieren, dass der Übergang zum Fahrsteig eine eigene Transition darstellt, die an bestimmte Voraussetzungen gebunden ist, z. B. eine bestimmte Breite oder Barriere-Einschränkung hat. Es sind weitere Differenzierungen modellierbar, etwa Unterteilungen oder Übergangseigenschaften des Gangs, die durch zusätzliche Raumübergangstransitionen mit Übergangstypen oder Barriereangaben und Raum-Stellen mit Kapazitäten spezifiziert werden können. Für die Drehtür in Nr. (vii) sind zwei Topologie-Ausschnitte modelliert. Die Repräsentation Nr. (vii.i) beschreibt die Drehtür durch Raumübergangstransitionen, da sie in beide Richtungen genutzt werden kann. Eine Kapazität ist nicht Gegenstand der Modellbildung. Ist diese relevant, ist eine Repräsentation durch eine Raum-Stelle für die Drehtür erforderlich, wie in Nr. (vii.ii) dargestellt. Dieses Beispiel zeigt, dass für die Einordnung eines Objekts als Raum oder Raumübergang nicht immer alle Eigenschaften zutreffen müssen. Wenn die Kapazität, wie in diesem Beispiel, relevant ist, wird das Objekt zwar als Raum repräsentiert, aber die Eigenschaft des Verweilens oder die Nutzung von Funktionen durch Bewegung in dem Raum sind für die Drehtür nicht zutreffend. Die Eigenschaften sind also als notwendige aber nicht als hinreichende Voraussetzungen für die Einordnung zu werten. Die Modellierung einer Aufzugsanlage macht deutlich, dass die Einordnung des Objekts als Raum oder Übergang auch von der Komplexität des entstehenden Gebäudetopologiemodells beeinflusst werden kann, wenn dies für den Modellierer aufgrund der gegebenen Werkzeugunterstützung relevant ist. Nr. (iv) zeigt einen Topologie-Modell-Ausschnitt, der die Kabine als Raum repräsentiert. Nr. (viii) zeigt einen Topologie-Modell-Ausschnitt, welcher den Übergang zwischen den Geschossen mit dem Raumübergang zwischen Geschoss und Kabine verbindet. Die Kabine tritt in dieser Repräsentation nicht in Erscheinung. Der Vorteil des Modells aus Nr. (iv) ist die Repräsentation der Kabine samt ihrer Kapazität und die geringere Komplexität des Topologie-Netzes. Außerdem kann der Übergang in

die Kabine für jedes Geschoss hinsichtlich Übergangstyp und Barriereangaben spezifiziert werden. Das Topologie-Netz in Nr. (viii) hat eine höhere Komplexität der Struktur. Vorteilhaft ist die Repräsentation des direkten Übergangs zwischen verschiedenen Geschossen, wobei die Übergangstypen oder Barriereangaben in diesem Modell nicht pro Geschoss repräsentiert werden können. Die Aufzugsanlage ist als reiner Raumübergang repräsentierbar, wenn die Kabine und die Komplexität des Topologie-Modells irrelevant sind. Ein Modell aus Raum-Stelle und Übergangstransitionen ist dann passend, wenn die Kabinenkapazität und die Raumübergänge pro Geschoss relevant ist. In diesem Fall sind die Eigenschaften Verweilen und Belegung gegeben, aber nicht im Sinne wie bei gewöhnlichen Räumen zur Nutzung von Funktionsangeboten, außer für den reinen Transport durch die Kabine.

Die Vertreter besonderer Objekte in der Gebäudetopologie zeigen, dass die aufgeführten Eigenschaften als notwendige Voraussetzungen eine Orientierungshilfe für die Modellbildung sind. Entscheidend ist die Intention und Verständlichkeit des entstehenden Gebäudetopologiemodells, dessen Komplexität außerdem zu beachten ist. Eine weitergehende Ausarbeitung einer Modellierungsvorschrift wäre eine lohnenswerte Ergänzung auf Basis dieser Arbeit. Dabei ist einerseits der architektonische Aspekt und andererseits der Aspekt der Werkzeugunterstützung der Modellbildung zu betrachten.

Die Eigenschaften für die Einordnung bei der Abbildung von ...	Im Modell abgebildet durch:	Besondere Objekte in der Gebäudetopologie (Beispiele)			
... Räumen sind:	Raum-Stellen	Raumartige Objekte			
		Flur	Aufteilbarer Raum	Raum mit variabler Kapazität	Aufzugsanlage und -kabine
• Kapazität	Room Capacity Memory	logistisch relevant	zusätzliche Raum-Stellen nötig	veränderbar	logistisch relevant
• Verweilen, Belegung	Room Allocation Memory	logistisch relevant	zusätzliche Raum-Stellen nötig	keine Besonderheit	keine Besonderheit
• Ein-/Ausstreten	Ein- und ausgehende Kanten	hat Übergänge	zusätzliche Übergänge erforderlich	keine Besonderheit	2*n Übergänge bei n Geschossen
• Bewegung im Raum im Rahmen der Nutzung	Bewegung im Raum wird in diesem Modell nicht explizit dargestellt, jedoch die Funktionsangebote: Raumfunktionstransition <i>u:useFunction()</i>	Verbindung anderer Räume primärer Zweck; Aufenthalt und Funktionen möglich.	keine Besonderheit	keine Besonderheit	keine Bewegung und keine Nutzung außer zum Raum-übergang
<i>Anschauliche Darstellung in</i>	<i>Abbildung 15</i>	<i>(i)</i>	<i>(ii)</i>	<i>(iii)</i>	<i>(iv)</i>
... Raumübergang sind:	Raumübergangstransitionen	Raumübergangsartige Objekte			
		Fahrttreppe	Fahrsteig	Drehtür	Aufzugsanlage
• Verbindung zweier Räume	Ein- und ausgehende Kanten	transitiv	transitiv	transitiv, zwei Verbindungen, zwei Richtungen	n*(n-1) Verbindungen zwischen n Geschossen
• mit aktiver oder automatisierter Bewegung im Gebäude verbunden	Schaltvorgang von Transitionen	automatisierte Bewegung	automatisierte Bewegung	aktive Bewegung	Einstieg aktiv, Transport automatisch
• kontinuierlicher Durchsatz	Transition hat keine Belegung	beschränkter Durchsatz	beschränkter Durchsatz	beschränkter Durchsatz	beschränkter Durchsatz
• selbst kein geschlossener Raum	Transition hat keine Kapazität	abgeteiltes Gebäudeelement	abgeteiltes Gebäudeelement	abgeteiltes Gebäudeelement	geschlossen, beschränkte Kapazität
<i>Anschauliche Darstellung in</i>	<i>Abbildung 15</i>	<i>(v)</i>	<i>(vi)</i>	<i>(vii)</i>	<i>(viii)</i>

Tabelle 15: Modellierung besonderer Objekte der Gebäudetopologie

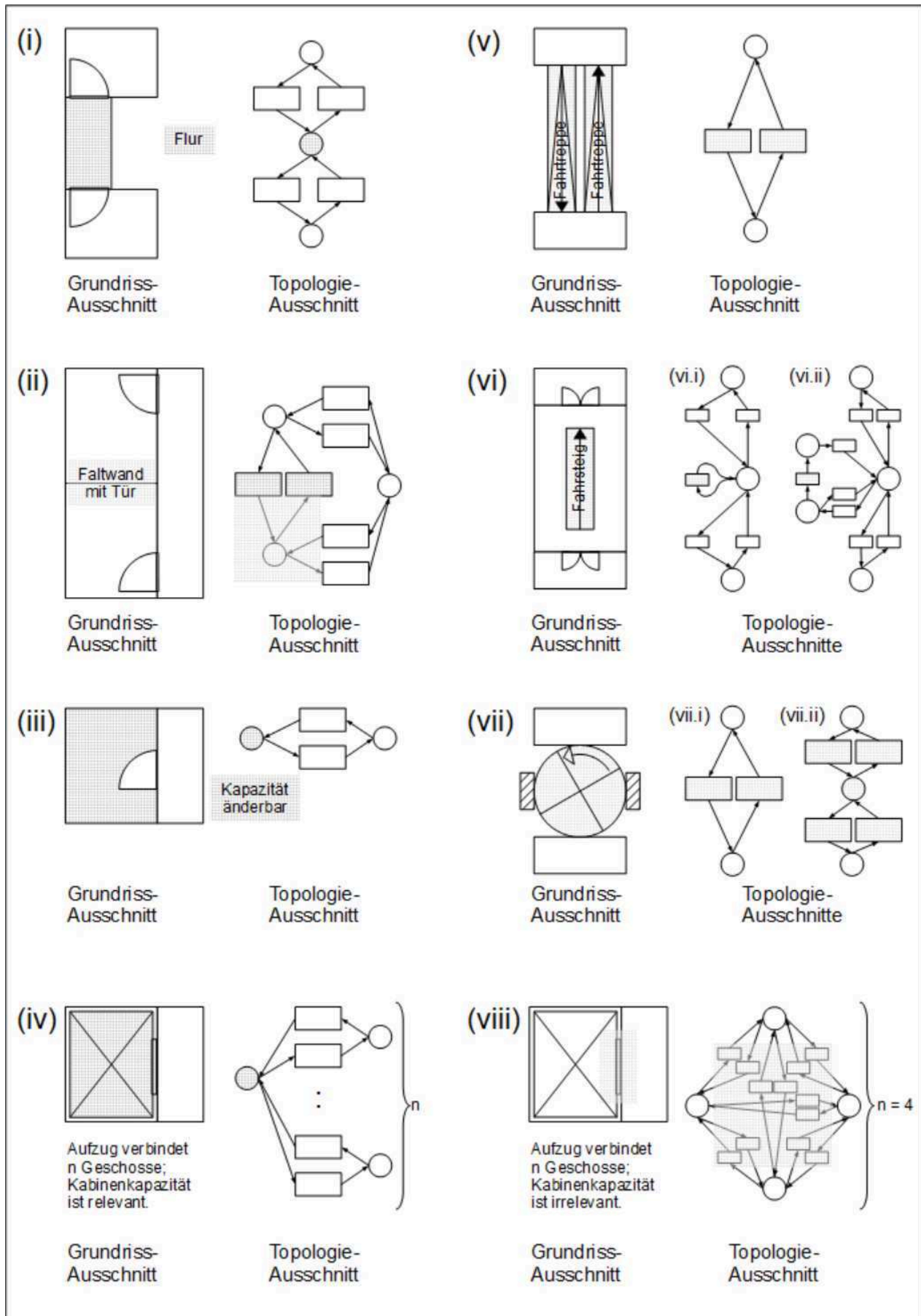


Abbildung 15: Modellierung besonderer Objekte der Gebäudetopologie

5.1.3 Metamodell der Nutzung

Die Nutzung eines Gebäudes besteht gemäß 4.2 aus der Bewegung im Gebäude und Anwendung von im Raum angebotenen Funktionen.

Die Bewegung erfolgt von einem Herkunftsraum zu einem Zielraum über einen Raumübergang, in der Petrinetz-Terminologie also von einer Raum-Stelle zu einer zweiten Raum-Stelle, die durch in Bewegungsrichtung gleichgerichtete Kanten mit der zwischen diesen angeordneten Raumübergangstransition verbunden sind. Für die Bewegung über eine Raumübergangstransition sind im Rahmenwerk die Festlegungen zu Prüfungen des Übergangstyps, der Barriereangabe und der Berechtigung repräsentiert. Diese Repräsentation wird im Regelwerk *Room Transition Definitions* durch folgende Transitionen beschrieben: *Role based allowed Access* und *Usecase individually allowed Access*.

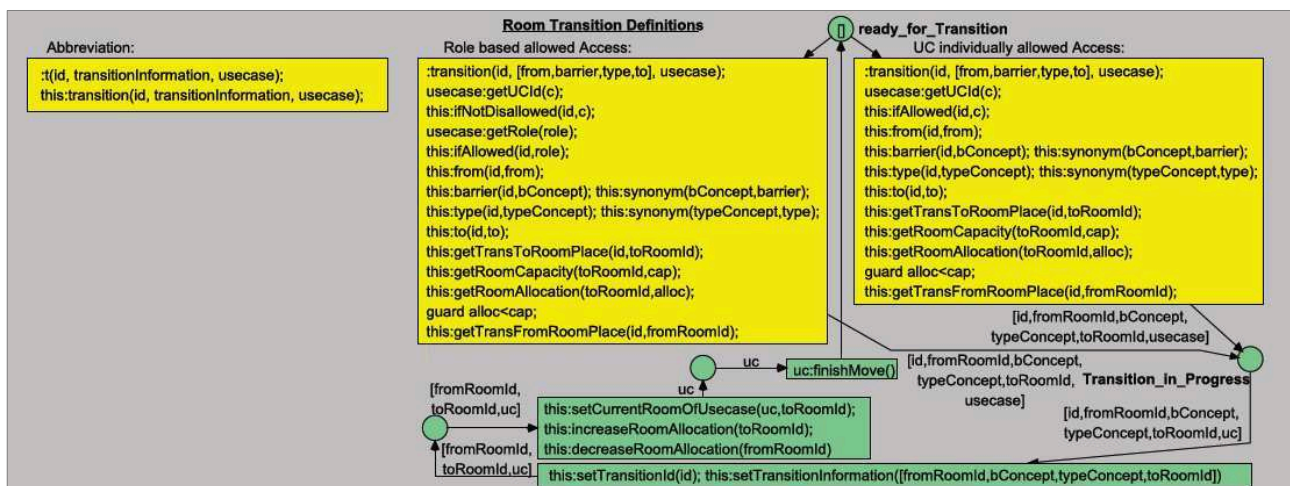


Abbildung 16: Regelwerk Room Transition Definitions

Alle drei Transitionen haben gemeinsam, dass ihre Signatur die Identifikation der Übergangstransition und die Transitionsinformation enthält. Wie in 5.1.2 erläutert, handelt es sich um Parameter des Synchronisationskanals *transition* der Transition.

Die Transitionen repräsentieren die Übergangslogik. Ein möglicher Übergang an der Transition mit der Identifikation *id* erfordert in allen Varianten, dass die Transition topologischer Nachfolger eines Raums mit der Bezeichnung *from* und Vorgänger eines Raums mit der Bezeichnung *to* ist und die Barriereangabe *barrier* und den Übergangstyp *type* hat. Des Weiteren ist es erforderlich, dass die Raumkapazität eingehalten wird. Dazu wird zunächst der Zielraum der Transition anhand des in 5.1.2 erläuterten Speichers *Room Place Definitions Memory* des Rahmenwerks ermittelt. Mit dieser Identifikation werden aus den an selber Stelle erläuterten Speichern die Eigenschaften Raumkapazität und Raumbellegung abgefragt und verglichen. Bei den Regelwerken *Role based allowed Access* und *Usecase individually allowed Access* wird die Zugangsberechtigung geprüft. Die Regel *Role based allowed Access* erlaubt dann Zugang, wenn für die Rolle, die dem Nutzungsfall zugeordnet ist, der Zugang erlaubt ist und gleichzeitig der Zugang für den einzelnen Nutzungsfall nicht untersagt ist. Die Regel *Usecase individually allowed Access* erlaubt dann Zugang, wenn der Zugang für den einzelnen Nutzungsfall erlaubt ist.

Sind alle diese Fakten erfüllt, ist der Übergang möglich, was in Petrinetz-Terminologie zur Schaltbereitschaft der Raumübergangstransition repräsentiert wird. Wird der Übergang vollzogen, repräsentiert durch ein Schalten der Raumübergangstransition, sind vorhandene Variablen der Transitionsinformation *from*, *barrier*, *type* und *to* mit Werten belegt, die dann eine Voraussetzung für den Übergang beschreiben.

Durch Schalten werden Zustände, beginnend mit dem Zustand *Transition_in_Progress*, eingenommen, die im gesamten Gebäudemodell einen weiteren Übergang so lange verhindern, bis durch die folgenden Transitionen zuerst die Transitionsinformationen in den Speichern *Current Transition Id* und *Current Transition Information* für die Aufzeichnung der Nutzungsfälle aktualisiert ist, zweitens die durch den Übergang veränderte Raumzuordnung des Nutzungsfalls und die Raumbelegung gespeichert werden, und drittens dem Nutzungsfall bestätigt wird, dass die Bewegung abgeschlossen wurde, um Inkonsistenzen im Gebäudemodell auszuschließen. Nach Schalten dieser Transition wird der Zustand *ready_for_Transition* wieder erreicht und eine Bewegung zwischen Räumen ist wieder möglich.

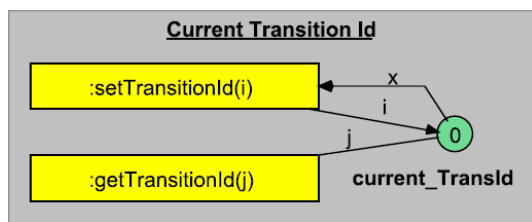


Abbildung 17: Speicher Current Transition Id

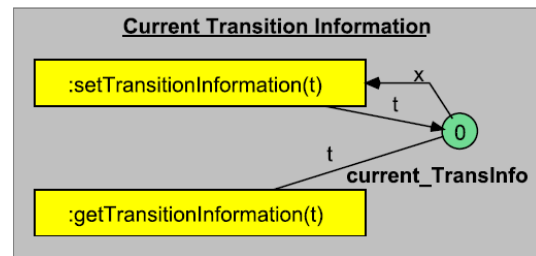


Abbildung 18: Speicher Current Transition Information

Zur Vereinfachung der Schreibweise sind Abkürzungen für die Definition der Transitionen bzw. ihrer Synchronisationskanäle definiert. Sie finden Verwendung in der Modellierung der Gebäudetopologie und der Beschriftung der Übergangstransitionen.

Die Auswertung der Zugangsberechtigung stützt sich auf den Speicher *Room Access Definitions Memory (Transition Allowness Definitions)* des Rahmenwerks. Hier wird für eine Gebäudetopologie im Spezifikationsnetz pro Raumübergangstransition definiert, für welche Transition eine Rolle oder ein Nutzungsfall berechtigt ist und für welche nicht. Dies wird als Paar *[transitionId,roleOrUC]* in den Stellen *allowed_Transitions* bzw. *disallowed_Transitions* gespeichert, wobei jeweils die Identifikationen für die Transition und den Nutzungsfall bzw. die Bezeichnung der Rolle im Paar angegeben werden.

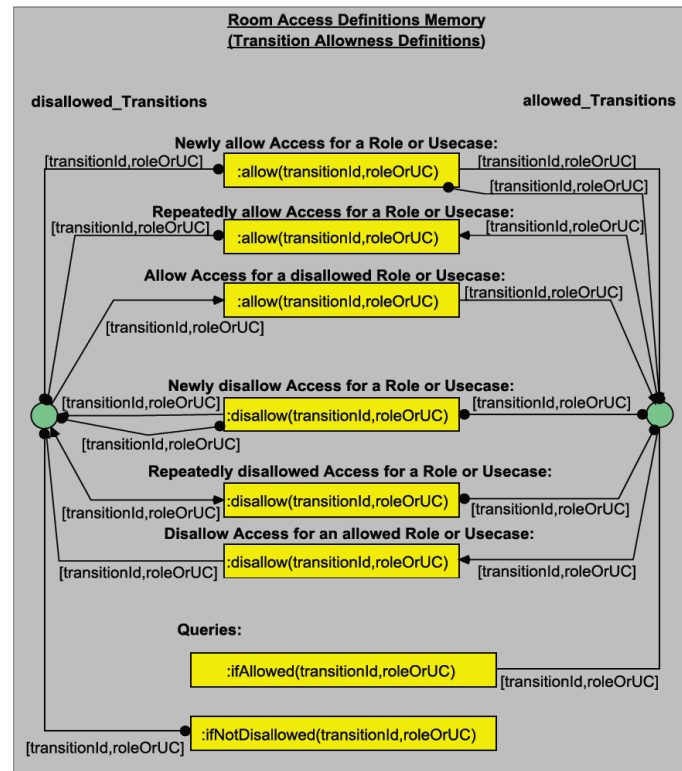


Abbildung 19: Speicher Room Access Definitions Memory (Transition Allowness Definitions)

Das *Funktionsangebot eines Raums* ist wie in 5.1.2 beschrieben im Topologie-Netz an einer Raum-Stelle verortet, ohne dass eine Funktion dieses Raums spezifiziert und repräsentiert ist. Die Modellierung eines Funktionsangebotes und damit Nutzbarmachung einer Raumfunktion wird durch das Metamodell im Rahmenwerk und Spezifikationsnetz beschrieben.

Das Rahmenwerk sieht zwei Repräsentationen vor: Erstens einen Speicher für die Spezifikation des Raumfunktionsangebotes durch Angabe von Raumfunktionen für Raum-Stellen. Zweitens ein Regelwerk, welches die Logik der Nutzung der angebotenen Funktionen definiert.

Der Speicher *Room Use Definitions Memory* im Rahmenwerk erlaubt die Spezifikation von Raumfunktionen für Raum-Stellen. Die Spezifikation erfolgt für ein Gebäude im Spezifikationsnetz durch den synchronen Kanal *defRoomUse(roomId,function)* und setzt die Festlegung einer Raumidentifikation *roomId* voraus, während die Funktion *function* durch einen Bezeichner (Zeichenkette, String) frei benannt wird. Einer *roomId*, d. h. einer Raum-Stelle, können mehrere Funktionsbezeichnungen zugeordnet werden, und eine Funktionsbezeichnung kann mehreren *roomIds* zugeordnet werden. Die Nutzung der Funktion wird durch den Kanal *use(roomId,function)* des Speichers repräsentiert. Ist das Paar *(roomId,function)* nicht im Speicher enthalten, kann die diesen Kanal per Downlink einbindende Transition nicht schalten, und dies bedeutet, dass die Nutzung nicht möglich ist, weil der Raum die Funktion nicht anbietet.

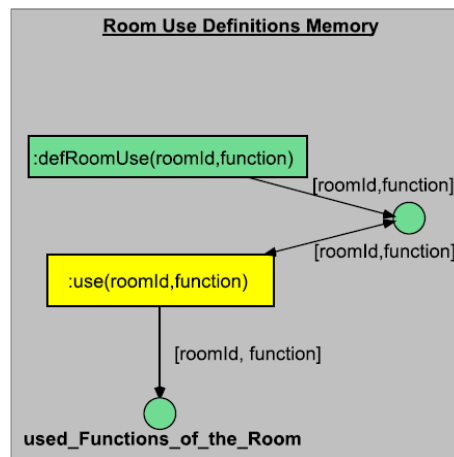


Abbildung 20: Speicher Room Use Definitions Memory

Das Metamodell unterstützt die Modellierung von drei Nutzungsarten. Die *einfache Nutzung* einer Funktion wird mit der genannten Nutzungsfunktion *use* repräsentiert. Die beiden weiteren Nutzungsarten sind Formen einer gemeinsamen Nutzung. Die eine Form beschreibt eine Nutzung durch eine festgelegte Anzahl an Teilnehmern, die andere Form eine Nutzung durch Teilnehmer festgelegter Rollen. In der ersten Form ist die Rolle nicht relevant. Beide Formen beziehen sich auf die einfache Nutzung von Raumfunktionen.

Die *Auswahl der Nutzungsart* wird durch den Nutzungsfall gesteuert, der in 5.1.4 beschrieben wird. Die *Verarbeitung der Auswahl* erfolgt im Rahmenwerk durch Transitionen der Verteilerlogik *Room Use Definition*, *Room Joined Use Definition* und *Room Joined Team Use Definition*. Die Regelwerke werden im Zusammenhang mit der Modellierung der Gebäudenutzung in 5.1.5 detailliert erläutert. Diese Erklärung zur Verteilerlogik bei der Zusammenführung von Funktionsanforderung des Nutzungsfalls und des Funktionsangebots der Gebäudetopologie erfordert die grundlegende Erklärung der Regelwerke des Nutzungsfalls in 5.1.4 und der Nutzung, die hier erfolgt. Die folgende Beschreibung ist daher als Einstiegserklärung zu verstehen.

Die Transition *Room Use Definition* definiert den Uplink *:singleUse(usecase,function)*, der aufgerufen wird, um eine einfache Funktion zu nutzen. Allen Transitionen der Verteilerlogik ist gemeinsam, dass zunächst die Raum-Stelle des aufrufenden Nutzungsfalls im Gebäudetopologie-Netz lokalisiert wird, um dann in diesem Raum die Nutzung auszulösen. Im Fall der einfachen Nutzung bedeutet dies den Downlink auf den o. g. Kanal *use*. Zum Modell der Gebäudenutzung wird in 5.1.5 weiter auf dieses Zusammenspiel eingegangen und dort in Abbildung 37 die Logik gezeigt. Die Regelwerke für die *Verarbeitung der Auswahl gemeinsamer Nutzung* sind gleichförmig aufgebaut. Durch das Metamodell ist definiert, dass die gemeinsame Nutzung in zwei Phasen abläuft: Es gibt eine erste Phase des Zusammenkommens und eine zweite Phase der gemeinsamen Nutzung nach Abschluss des Zusammenkommens. Das Regelwerk *Room Joined Use Definition* definiert für die Phase des Zusammenkommens den Uplink *:joiningUse(usecase,function,n)*, der insbesondere die Anzahl der Teilnehmer spezifiziert. Für die Phase der Nutzung ist der Uplink *:joinedUse(usecase,function)* definiert. Die weitere Logik der gemeinsamen Nutzung wird in 5.1.5 beschrieben, und Abbildung 38 veranschaulicht das Regelwerk. Das Regelwerk *Room Joined Team Use Definition* definiert für die Phase des Zusammenkommens den Uplink *:joiningTeamUse(usecase,function,role)*, der insbesondere die Rolle des Teilnehmers, der der Nutzung beitrifft, spezifiziert. Für die Phase der Nutzung

ist der Uplink `:joinedTeamUse(usecase,function)` definiert. Die weitere Logik der gemeinsamen Nutzung wird in 5.1.5 beschrieben, und Abbildung 39 veranschaulicht das Regelwerk.

Diese skizzierte Verteilerlogik für die Verarbeitung des Zusammenführens von Nutzungsfall und Gebäudetopologie wird in 5.1.5 genauer erklärt. Im Folgenden werden nun die Regelwerke beschrieben, die im Hintergrund wirken und die gemeinsame Nutzung tatsächlich koordinieren. Insbesondere realisieren sie die zwei Phasen der gemeinsamen Nutzung.

Die *gemeinsame Nutzung durch eine festgelegte Anzahl an Teilnehmern ohne Rollenrelevanz* wird durch das Regelwerk *Room Joined Use* im Rahmenwerk definiert. Das zugehörige Referenznetz ist in Abbildung 21 dargestellt. Die Festlegung der Anzahl erfolgt zusammen mit der Verortung der gemeinsamen Nutzung einer Raumfunktion in einem Raum im Nutzungsfall; dies wird in 5.1.4 näher beschrieben. Die Phase des Zusammenkommens der Teilnehmer wird über den Zustand der Stelle `registered_entered_Participants` durch die Bedingung der Transition `close_Registration` kontrolliert. Die Bedingung vergleicht die Anzahl der eingetroffenen Teilnehmer mit der für die Nutzung festgelegten Anzahl an Teilnehmern. Ist diese Bedingung erfüllt, wird die Phase des Zusammenkommens beendet und die Phase der gemeinsamen Nutzung abschließend durchgeführt, die durch Schalten der Transition mit dem Uplink `:finishJoinedUse(roomId,function)` repräsentiert wird. Dieser Uplink wird durch Synchronisation mit dem Kanal `joinedUse(usecase,function)` des o. g. Regelwerks *Room Joined Use Definition* ausgelöst. Die Verarbeitung der durch Nutzungsfälle verursachten `finishJoinedUse`-Transition inkludiert den Downlink `use(roomId,function)` zur einfachen Nutzung der somit gemeinsam genutzten Funktion `function` im gemeinsam eingenommenen Raum. Nach Nutzung der Raumfunktion durch alle Teilnehmer wird der Teilnehmerzähler geleert.

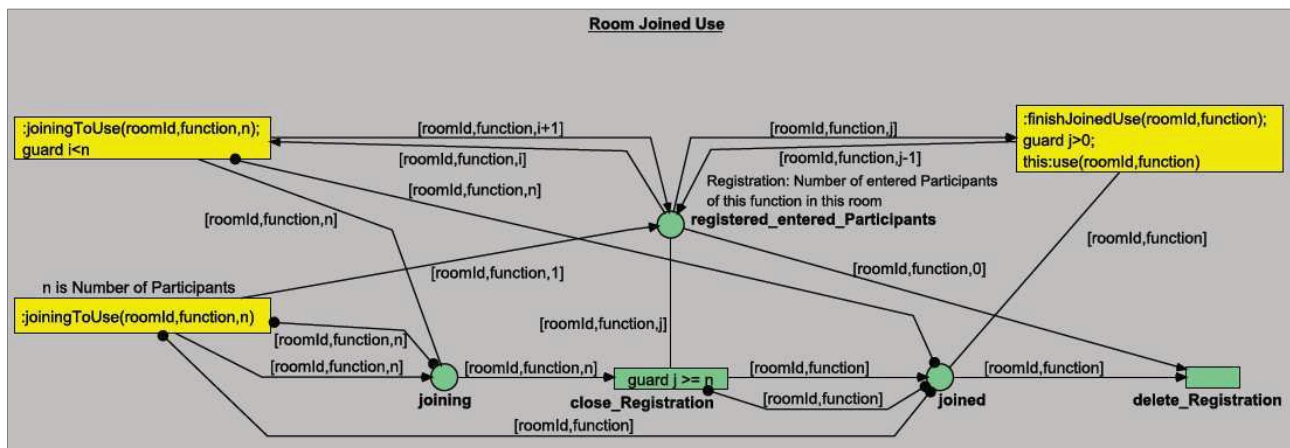


Abbildung 21: Regelwerk Room Joined Use

Die *gemeinsame Nutzung durch Teilnehmer mit vorgegebenen Rollen* wird durch das Regelwerk *Room Joined Team Use (Scenario)* im Rahmenwerk definiert. Abbildung 22 zeigt das zugehörige Referenznetz. Die Verortung der gemeinsamen Nutzung einer Raumfunktion in einem Raum erfolgt im Nutzungsfall; dies wird in 5.1.4 näher beschrieben. Die Vorgabe und Definition der Rollen erfolgt nicht im Nutzungsfall, sondern vor der Gebäudenutzung; eine Beschreibung wird in 5.1.5 gegeben. Ergebnis der Definition sind Spezifikationen von Rollen der Teilnehmer pro Raum und Funktion im Speicher `Roles_for_Team_Use_Scenario` und zur Verarbeitung hilfsweise die Anzahl

aller Rollen pro Raum und Funktion (*Number_of_Scenario_Participants_by_room,function*). Auch hier wird die Phase des Zusammenkommens in einer Stelle *number_of_entered_participants* durch Anzahlvergleich abgeschlossen. In der Stelle *registered_entered_Participants* werden parallel die Teilnehmer durch Tupel *[room,function,role]* repräsentiert und damit der Stelle *Roles_for_Team_Use_Scenario* der vorgegebenen Rollen für eine Raumfunktion entzogen. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass genau die Vorgabe zur Nutzung durch geplante Rollenvertreter pro Raumfunktion eingehalten wird. Mit Abschluss der Phase des Zusammenkommens bei Erreichen der vorgegebenen Teilnehmerzahl wird durch abschließende Verarbeitung⁴² der durch Nutzungsfälle veranlassten *finishJoinedTeamUse(roomId,function)*-Transition die einfache Nutzung *use* per Downlink synchron geschaltet, so dass auch hier gemeinsam die Funktion *function* im gemeinsam eingenommenen Raum genutzt wird. Auch hier wird nach Nutzung der Raumfunktion durch alle Teilnehmer die Teilnehmerliste geleert. Hier werden aber die Teilnehmer nicht einfach von einer Teilnehmerliste gelöscht, sondern es wird die ursprüngliche Vorgabe aus Raum, Funktion und Rolle im Ausgangspunkt *Roles_for_Team_Use_Scenario* wiederhergestellt.

⁴² Dies geschieht analog durch Synchronisation mit dem Kanal *joinedTeamUse(usecase,function)* des o. g. Regelwerks *Room Joined Use Definition*.

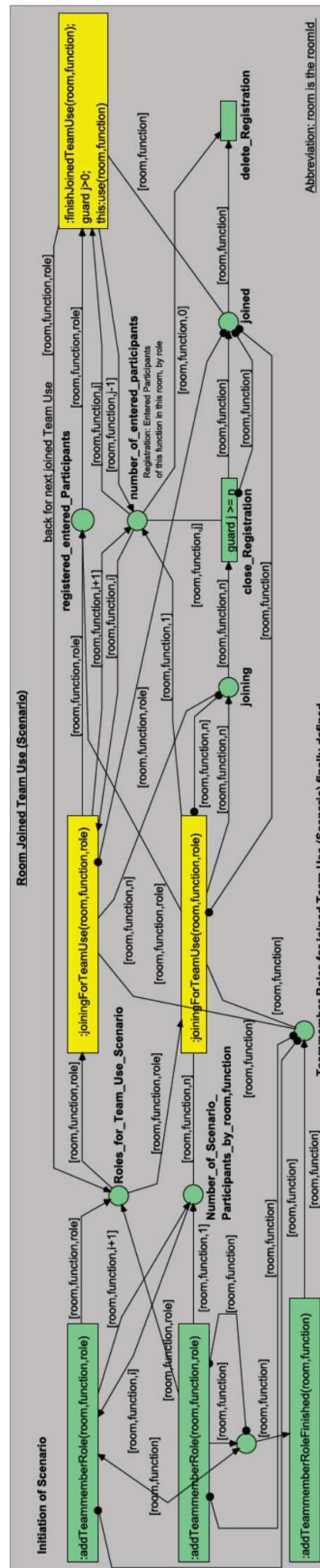


Abbildung 22: Regelwerk Room Joined Team Use (Scenario)

5.1.4 Metamodell des Nutzungsfalls

Wie in 4.2 definiert ist ein Nutzungsfall eine Spezifikation der Nutzungsanforderung, die angibt, dass die Nutzung eines Gebäudes aus Bewegungen im umbauten Raum, d. h. zwischen Räumen, und aus der Anwendung der in Räumen angebotenen Funktionen besteht. Die Idee, wie in 5.1.2 beschrieben, eine Gebäudetopologie als Struktur aus Räumen und Übergängen zwischen diesen aufzufassen, wird hier aufgegriffen als Grundlage der Modellierung des Nutzungsfalls. Die Festlegung der Modellierungsbasis in 4.4.4 und dort in den Tabellen 10 und 11 ist Grundlage dafür, das Modell eines Nutzungsfalls als Referenznetz, das sogenannte *Nutzungsfallnetz*, zu definieren.

Ein Nutzungsfall wird aus Referenznetzen modelliert. Ein Modell eines Nutzungsfalls wird als *Referenznetz des Nutzungsfalls*, kurz *Nutzungsfallnetz*, repräsentiert und besteht aus folgenden Referenznetzen:

- Das für jeden Nutzungsfall spezifische *Nutzungstopologie-Netz* ist ein Referenznetz, welches die modellierte Topologie des Nutzungsfalls aus Stellen für Räume und Transitionen für die Raumübergänge repräsentiert. Das Nutzungstopologie-Netz hat die einzige Aufgabe, die Zusammenhänge zwischen Räumen und Raumübergängen durch Kanten für Bewegungsrichtungen sowie Funktionsangebote von Räumen zu beschreiben. Es fungiert in der später näher beschriebenen Modellierung der Gebäudenutzung als Elementnetz, welches die Bewegungen und die Nutzungen im Gebäude vorgibt.

Es ist zulässig, dass ein Nutzungsfallnetz *mehrere Nutzungstopologie-Netze* spezifiziert. Es handelt sich um verschiedene Ausprägungen bzw. Typen, etwa um die Nutzung für verschiedene Nutzerrollen zu spezifizieren. Jedes Nutzungstopologie-Netz hat zur eindeutigen Bezeichnung eine Typen-Identifikation, die für die Aktivierung festgelegt wird.

- Das in 5.1.1 genannte *Nutzungsrahmenwerk*, welches Referenznetze zur Repräsentation grundlegender Entitäten und Regelwerke für Nutzungsfälle umfasst.

Einem Nutzungsfallnetz kann eine Rolle zugeordnet werden. Diese Rolle repräsentiert eine Nutzerrolle, wobei der Nutzer des Gebäudes nicht modelliert wird. Die Rolle wird im Speicher *User Role Definition Memory* verwaltet. Sie wird gesetzt in der Initialisierung der Gebäudenutzung, wie in 5.1.5 beschrieben. Und sie wird abgefragt in der Prüfung der Zugangsberechtigung bei der Nutzung von Raumübergangstransitionen im Fall *Role based allowed Access*, in 5.1.3 dargestellt, und der *gemeinsamen Nutzung durch Teilnehmer mit vorgegebenen Rollen*, die im Regelwerk *Room Use Definition* des Nutzungsrahmenwerks benötigt wird, wie weiter unten erläutert wird.

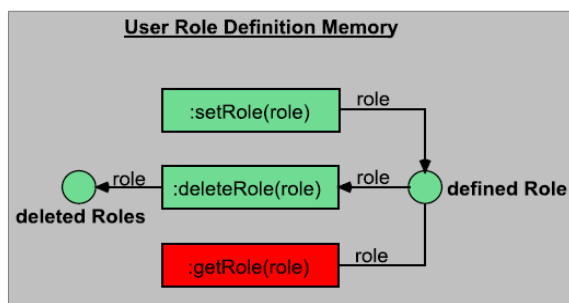


Abbildung 23: Speicher User Role Definition Memory

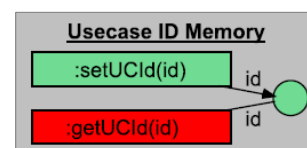


Abbildung 24: Speicher Usecase ID Memory

Barriereangabe). Sollen keine spezifischen Eintragungen erfolgen, werden Variablen (Konvention: in Kleinbuchstaben) oder als namenlose Variable der Unterstrich () eingesetzt. Die Bezeichnungen können einer Begriffshierarchie entstammen. Je nach Modellierungsansatz können also auch Raumtypen benannt und angefordert werden. Gleiches gilt für Barriereangaben und Übergangstypen.

Das *Nutzungstopologie-Netz* spezifiziert eine Nutzungsanforderung, die durch die Netzstruktur aus Wunsch-Raum-Stellen und Raumübergangstransition beschrieben wird. Hierdurch wird spezifiziert, welche topologische Struktur das Gebäude aufweisen soll. Wesentliches Spezifikationsmittel ist die genannte Transitionsinformation. Die Transitionsinformation *move([from, barrier, type, to])* wird im Synchronisationskanal jeder Raumübergangstransition angegeben. Die Transitionsinformation der Raumübergangstransition *T* zwischen zwei Wunsch-Raum-Stellen *S1* und *S2* mit gerichteten Kanten von *S1* zu *T* und *T* zu *S2* hat die *Bedeutung*, dass ausgehend von einer Belegung (im Sinne Aufenthalt) des Herkunftsraums mit der Bezeichnung *from* eine Bewegung in einen Raum mit der Bezeichnung *to* gewünscht ist, die über einen Raumübergang mit einer Barriere mit der Bezeichnung *barrier* und einem Übergangstyp *type* erfolgen soll. Im Nutzungsrahmenwerk wird diese Bewegungsanforderung durch das Regelwerk *Room Move Definition* abgebildet. Es ist koordiniert mit der Raumübergangstransition des Topologie-Netzes durch den Uplink *:finishMove()* und hat im zweiten Schritt die Funktion zur Aufzeichnung der Bewegungsdaten (bzw. Raumübergangsdaten), bestehend aus Identifikation der Übergangstransition *id* und der Transitionsinformation *t*, mit Hilfe der Funktion *this:appendMoveTransitioninfo(id, t)* des Speichers *Use Recording*, welcher Daten über den Nutzungsverlauf für mögliche Auswertungen speichert. Für jede Bewegung wird ein Datensatz aus Usecase-Identifikation, aktiviertem Nutzungsfalltyp⁴³, der Rolle des Nutzungsfalls, der im Folgenden beschriebenen Nutzungsorientierung, der genutzten Raumübergangstransition und der Transitionsinformation aufgezeichnet.

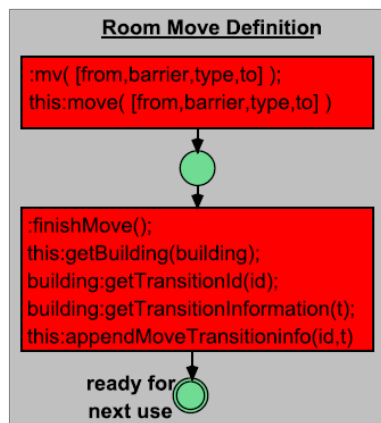


Abbildung 26: Regelwerk Room Move Definition

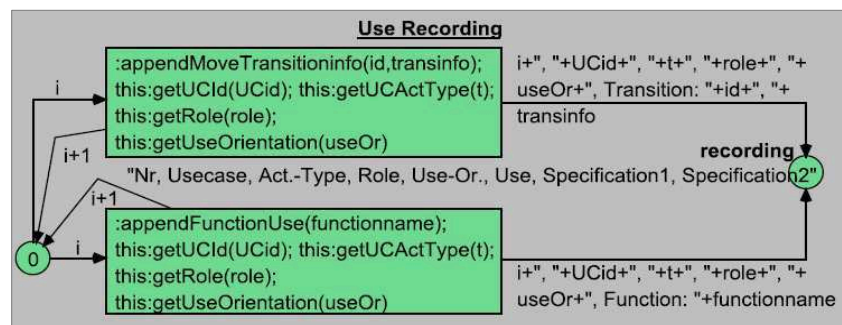


Abbildung 27: Speicher Use Recording

Für die Modellierung der Schnittstelle des Nutzungsfalls zur Gebäudenutzung wird durch das *Nutzungsrahmenwerk* das Regelwerk *Room Function Use and Move Definition* bereitgestellt. Dieses Regelwerk umfasst zum einen die Transitionen, die die Schnittstelle für Funktionsnutzung und Bewegung (Raumübergangsanforderung) repräsentieren, und zum anderen die Logik der *Nutzungsausprägung des Nutzungsfalls*. Zu letzterem wird für die bewegungs- und funktionsorien-

⁴³ Vergleiche Beschreibung zur Aktivierung im Modell der Gebäudenutzung in 5.1.5 und insbesondere Abbildungen 32 und 33.

tierte Nutzung für den Nutzungsfall, abhängig von der Einstellung, die Bewegung (Raumübergangsanforderung, *move*) oder Funktionsnutzung (*useFunction*) bevorzugt ermöglicht. Die Einstellung wird durch den Parameter *useOrientation* eingebracht, der aus dem Speicher *Use Orientation Memory* abgefragt wird. Für die Bevorzugung der Funktionsnutzung, repräsentiert durch einen Parameterwert größer Null, wird *useOrientation*-mal die Transition *:useFunction()* schaltbereit gesetzt, bevor dann die Transitionen *:useFunction()* und *:m(transitioninfo)* (für *move*) gleichberechtigt schaltbereit gesetzt sind. Zur Bevorzugung der Bewegung (Raumübergangsanforderung), repräsentiert durch einen Parameterwert kleiner Null, erfolgt dies entsprechend umgekehrt. Immer ist die Schaltbereitschaft der Transition *:m(transitioninfo)* davon abhängig, dass der Nutzungsfall nicht in eine gemeinsame Nutzung eingetreten ist, und daher den Ort der Nutzung nicht wieder verlassen soll. Ist der Parameterwert von *useOrientation* gleich Null, ist eine neutrale Nutzungsausprägung gegeben.

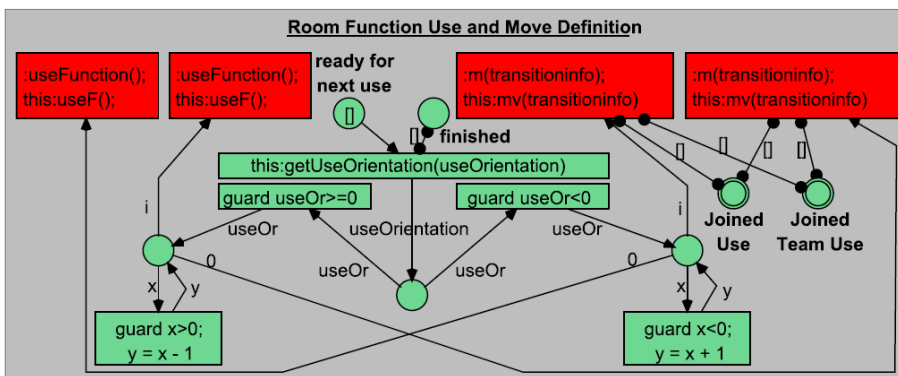


Abbildung 28: Regelwerk Room Function Use and Move Definition

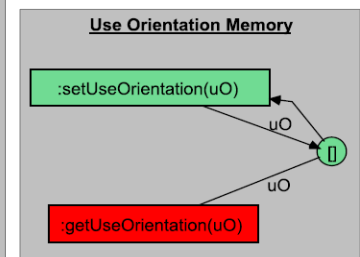


Abbildung 29: Speicher Room Use Orientation Memory

Eine *Raumfunktionstransition* (präzise *Raumfunktionsanforderungstransition*) im Nutzungstopologie-Netz spezifiziert die Anforderung, dass in dem genutzten Raum eine Funktion angewendet wird. Gemäß 4.2 und 5.1.1 werden drei Nutzungsarten unterschieden. Für diese Nutzungsarten sind folgende Notationen vorgesehen, um zu definieren, dass an einer Wunsch-Raum-Stelle eine Raumfunktion in einer der drei Nutzungsarten angewendet werden soll. Allen gemeinsam ist, dass jede dieser Transitionen durch eine bidirektionale Kante mit der Wunsch-Raum-Stelle verbunden ist, wie z. B. in Abbildung 25 dargestellt.

1. Erstens kann die Anforderung einer *einfachen Funktionsnutzung* spezifiziert werden: Die Transition ist mit dem Synchronisationskanal *:use(function)* als Uplink beschriftet. Der Parameter *function* spezifiziert die geforderte Funktion. Das Modell sieht vor, dass *function* eine Bezeichnung vom Typ String (Zeichenkette) ist.
2. Die Anforderung einer *gemeinsamen Nutzung durch eine festgelegte Anzahl an Teilnehmern ohne Rollenrelevanz* wird durch die Verwendung zweier Transitionen notiert, die mit der Wunsch-Raum-Stelle verbunden sind. Die erste Transition repräsentiert eine Phase des Zusammenkommens der Teilnehmer und trägt die Beschriftung *:joiningUse(function,n)*, wobei *function* die durch *n* Teilnehmer gemeinsam zu nutzende Funktion bezeichnet. Die Bezeichnung ist vom Typ String (Zeichenkette). Die zweite Transition repräsentiert die abschließende gemeinsame Nutzung und hat die Beschriftung *:joinedUse()*.

3. Drittens wird die Anforderung einer *gemeinsamen Nutzung durch Teilnehmer mit vorgegebenen Rollen* ebenso durch die Verwendung zweier Transitionen notiert, die mit der Wunsch-Raum-Stelle verbunden sind. Die erste Transition repräsentiert wieder eine Phase des Zusammenkommens der Teilnehmer vorbestimmter Rollen und trägt die Beschriftung *:joiningTeamUse(function)*, wobei *function* die durch die Teilnehmer gemeinsam zu nutzende Funktion bezeichnet. Die Bezeichnung ist vom Typ String (Zeichenkette). Die zweite Transition repräsentiert die abschließende gemeinsame Nutzung und hat die Beschriftung *:joinedTeamUse()*.

An dieser Stelle sei klargestellt, dass das Modell eines Nutzungsfalls nicht das Regelwerk der Raumübergänge oder Funktionsnutzung definiert. Dies erfolgt im Rahmenwerk des Gebäudetopologie-Netzes, wie in 5.1.2 beschrieben. Ein Nutzungsfall definiert die *Anforderung* an die Bewegung, daher präzise Raumübergangsanforderung, durch das *Nutzungstopologie-Netz* und welche Nutzungsart und welche Funktion in einem Raum gefordert sind. Das Regelwerk *Room Function Use Definition* spezifiziert die *Verbindung* der Nutzungsarten mit dem Gebäudetopologie-Netz und mit den Regelwerken für die Raumfunktionsnutzung im Rahmenwerk. Abbildung 30 zeigt das zugehörige Diagramm. Bestandteil dieses Regelwerks ist die Aufzeichnung der Funktionsnutzung durch Aufruf der Funktion *this:appendFunctionUse(function)* des Speichers *Use Recording*, welcher Daten für weitere Analysen speichert. Für jede Funktionsnutzung wird ein Datensatz aus Usecase-Identifikation, aktiviertem Nutzungstyp⁴⁴, der Rolle des Nutzungsfalls, der zuvor beschriebenen Nutzungsorientierung und der Funktionsbezeichnung aufgezeichnet.

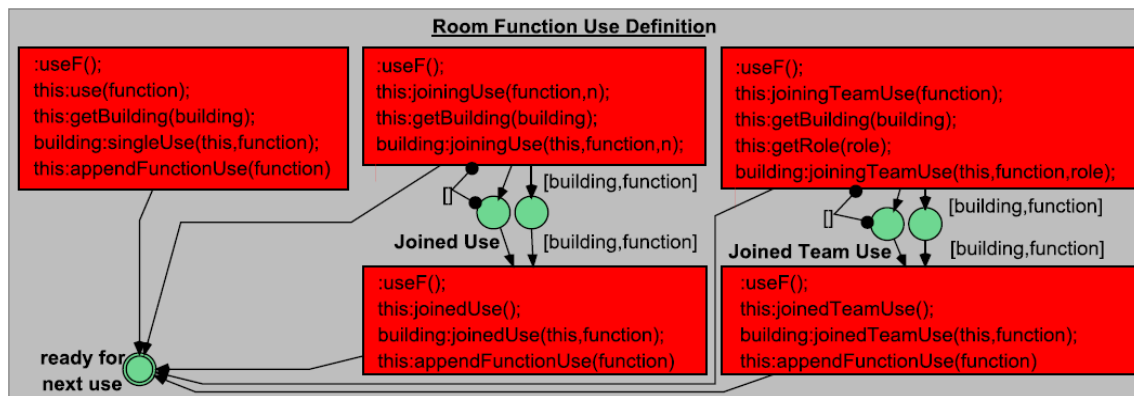


Abbildung 30: Regelwerk Room Function Use Definition

Für die drei genannten Nutzungsarten werden drei Verbindungsregeln definiert. In allen drei Fällen wird ein Anknüpfungspunkt *:useF()* durch das in Abbildung 28 gezeigte Regelwerk *Room Function Use and Move Definition* an die Verortung im Topologie-Netz der Gebäudetopologie, wie in 5.1.2 beschrieben, gegeben.

1. Im Fall der *einfachen Funktionsnutzung* erfolgt die Ermittlung der konkret geforderten Funktion an der genutzten Wunsch-Raum-Stelle durch *this:use(function)* im Nutzungstopologie-Netz. Eine Verbindung zum Regelwerk der Nutzung im Rahmenwerk des Gebäudetopologie-Netzes wird durch *this:getBuilding(building); building:singleUse(this,function)* hergestellt. Hierbei referenziert *this* dieses Nutzungsfallnetz, und durch den Speicher *getBuilding* des Speichers *Building Registration and Access* im Nutzungsrahmenwerk ist die Referenz auf das Gebäudetopologie-Netz gegeben.

⁴⁴ Vergleiche die Beschreibung zur Aktivierung im Modell der Gebäudenutzung in 5.1.5 und insbesondere Abbildungen 32 und 33. Der Speicher *Use Recording* ist in Abbildung 27 dargestellt.

2. Für die *gemeinsame Nutzung durch eine festgelegte Anzahl an Teilnehmern ohne Rollenrelevanz* ist die Verbindungsregel ebenso zweiphasig wie die Nutzung definiert. Die Ermittlung der konkret geforderten Funktion an der genutzten Wunsch-Raum-Stelle und der Anzahl an Teilnehmern erfolgt in der ersten Phase des Zusammenkommens in der ersten Transition durch *this:joiningUse(function,n)* im Nutzungstopologie-Netz. Zum Regelwerk der Nutzung im Rahmenwerk des Gebäudetopologie-Netzes wird die Verbindung durch *this:getBuilding(building); building:joiningUse(this,function,n)* hergestellt. In zweiten Phase erfolgt in der zweiten Transition die Verbindung durch Verortung im Nutzungstopologie-Netz mit *this:joinedUse()* und *building:joinedUse(this,function)* im Gebäudetopologie-Netz. Der Wartezustand wird durch die Stelle zwischen den Transitionen repräsentiert.
3. Die Verbindungsregel für die *gemeinsame Nutzung durch Teilnehmer mit vorgegebenen Rollen* ist dem zweiten Fall sehr ähnlich und in zwei Phasen definiert. Zusätzlich wird in der Phase des Zusammenkommens in der ersten Transition die Rolle dieses Nutzungsfalls ermittelt, um sie in die Synchronisation mit dem Nutzungsregelwerk des Gebäudetopologie-Netzes zu geben: *this:getBuilding(building); this:getRole(role); building:joiningTeamUse(this,function,role)*. In der Phase erfolgt die Verbindung nach dem gleichen Mechanismus.

Für einen Nutzungsfall kann eine Nutzungsabfolge, d. h. eine Reihenfolge der Nutzung von Funktionen oder Raumbesuchen definiert werden, wie in 4.3.1 in Tabelle 4 zum Nutzungsfall formuliert. Dies wird modelliert durch eine Abhängigkeit der Bewegung zwischen Räumen von der Erledigung von Funktionsnutzungen. Die Festlegung einer Abfolge von Funktionsnutzungen wird durch Statuszustände der Erledigung repräsentiert. Dazu wird eine Menge an zu erledigenden Aufgaben (*Tasks*) erdacht und durch *Task-Stellen* repräsentiert, wobei nur eine der Stellen markiert sein darf. Die Task-Stellen haben Bezeichner, die den Erledigungsstatus benennen. Die Markierung wird gesetzt durch das Schalten einer Raumfunktions- oder Raumübergangstransition. Hierbei wird eine Marke einer Task-Stelle, wenn vorhanden, entnommen und einer anderen Task-Stelle, wenn vorhanden, hinzugefügt. Die Marke in der Stelle markiert den Zustand der Erledigung. Die Markierung einer solchen Stelle kann abgefragt werden, um das Schalten einer Raumübergangstransition zu bedingen. Die Abfrage wird modelliert durch die Verbindung der Raumübergangstransition mit der Task-Stelle durch eine Testkante, in der Abbildung 31 durch eine gestrichelte Kante gezeichnet.

Jedes Nutzungstopologie-Netz darf nur eine Marke in den Wunsch-Raum-Stellen besitzen. Diese Marke ist eine unteilbare Marke ohne weitere Daten und repräsentiert den Nutzungszustand des Nutzungsfall, d. h. welcher Raum in diesem Zustand genutzt werden soll.

Ein Nutzungsfall kann verschiedene Ausprägungen, z. B. für unterschiedliche Rollen haben. Jedes Nutzungstopologie-Netz besitzt eine besondere Transition, die genau einen Nutzungsfall-Typ pro Instanz eines Nutzungsfallnetzes für die Gebäudenutzung aktiviert. Dieser Typ wird bei der Aktivierung des Nutzungsfalls in der Gebäudenutzung festgelegt, wie in 5.1.5 beschreiben. Die Transition trägt die Beschriftung *:activate(id)*, wobei *id* eine Typ-Identifikation ist, die eindeutig für alle Nutzungstopologie-Netze eines Nutzungsfallnetzes sein muss. Diese *activate*-Transition kann noch weitere Definitionen enthalten, beispielsweise eine Konstante für die Barriereangabe, die in den Transitionsinformationen der Raumübergangstransitionen verwendet werden kann. Abbildung 32 zeigt ein Beispiel. Die *activate*-Transition dient der Initialisierung und dem Start des Nutzungstopologie-Netzes, indem mögliche Definitionen initialisiert werden und eine Marke erzeugt wird, die in die eine Wunsch-Raum-Stelle gelegt wird, die im Nachfolgebereich der *activate*-Transition liegt. Jede Instanz eines Nutzungsfallnetzes speichert den aktivierten Typ im *Usecase Activated Type Memory*. Diese Information wird benötigt für die Protokollierung des Nutzungsverlaufes.⁴⁵

⁴⁵ Dies wird in 5.1.4 beschrieben. Die Protokollierung erfolgt im Speicher *Use Recording*, siehe Abbildung 27.

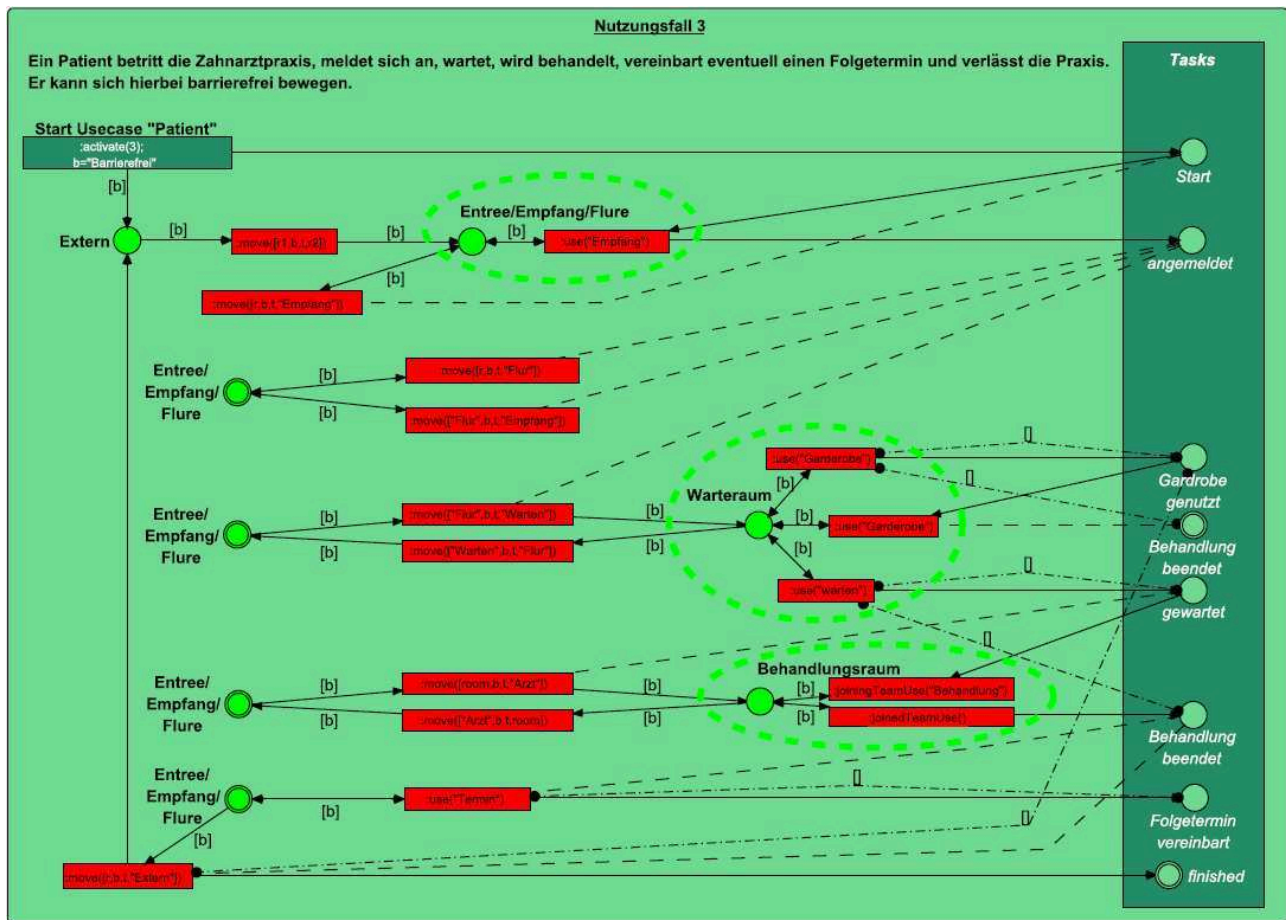


Abbildung 31: Spezifikation der Nutzungsabfolge in einem Nutzungsfall, Beispiel

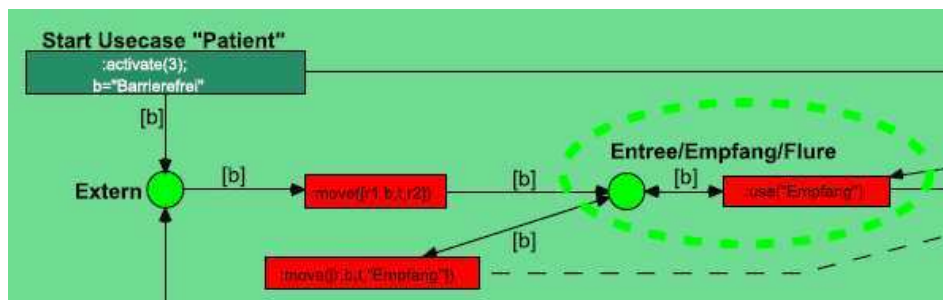


Abbildung 32: activate-Transition

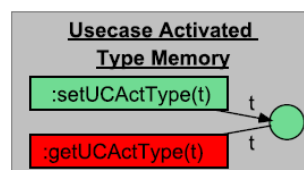


Abbildung 33: Usecase Activated Type Memory

Das *Nutzungsrahmenwerk* umfasst zwei weitere Hilfsspeicher. Das *Building Registration Memory* speichert eine Referenz auf das Gebäudetopologie-Netz. Durch das Regelwerk *Save Use Recording* wird die persistente Speicherung des Use Recording durchgeführt, wenn ein Nutzungsfall finalisiert ist. Dazu wird auf eine Regelwerk *Use Recording File* eines separaten gleichnamigen Referenznetzes zurückgegriffen, welches nicht zum Nutzungsrahmenwerk gehört.

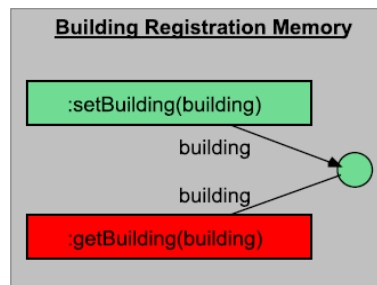


Abbildung 34: Speicher Building Registration Memory

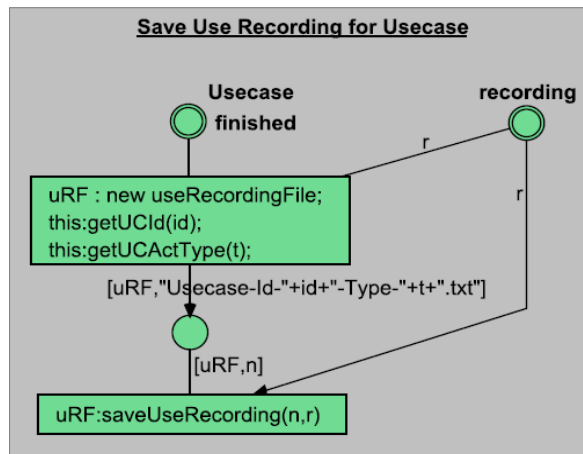


Abbildung 35: Regelwerk Save Use Recording

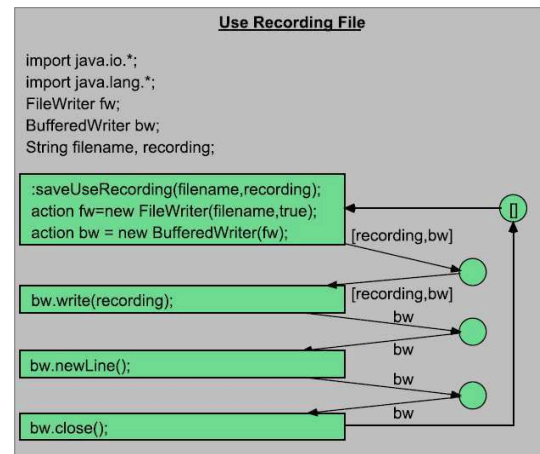


Abbildung 36: Regelwerk Use Recording File

5.1.5 Metamodell der Gebäudenutzung

Die Gebäudenutzung ist zu unterscheiden von dem in 5.1.3 erläuterten Begriff der Nutzung im Kontext der hier vorgestellten Methode. Während Nutzung definiert ist als Bewegung zwischen Räumen im Gebäude und Anwendung von angebotenen Funktionen, ist die Gebäudenutzung hier spezieller definiert, nämlich als die Verbindung zwischen Nutzungsfall und Gebäudetopologie bezüglich ihrer möglichen Nutzung. Ein *Modell der Gebäudenutzung* entsteht — in der Konsequenz der Definition von Gebäudenutzung in 4.2 — durch *Verbindung der Modelle der Gebäudetopologie und des Nutzungsfalls*. Die Modelle sind nach den vorangegangenen Definitionen ein

- Gebäudetopologie-Netz, bestehend aus *Topologie-Netz*, Rahmenwerk, Spezifikationsnetz und ein
- *Nutzungsfallnetz*, bestehend aus Nutzungstopologie-Netz und Nutzungsrahmenwerk.

Diese *Verbindung der Modelle entsteht genau dadurch, dass das Nutzungsfallnetz zum Elementnetz des Topologie-Netzes und das Topologie-Netz zum Systemnetz wird*. Das Topologie-Netz benötigt aber auch die anderen Referenznetze des Gebäudetopologie-Netzes. Daher wird im Folgenden der Einfachheit halber das Gebäudetopologie-Netz als *Gebäudetopologie-Systemnetz* und das Nutzungsfallnetz als *Nutzungsfall-Elementnetz* bezeichnet. Anschaulich ausgedrückt bedeutet die Gebäudenutzung, dass ein Nutzungsfall ein Objekt in der Gebäudetopologie ist und, genauer, die Referenz auf das Nutzungsfall-Elementnetz durch das Gebäudetopologie-Systemnetz transportiert wird. Für diese vereinfachte Darstellung wäre auch ein S/T-Netz ausreichend, wenn das Netz die Gebäudetopologie und eine Marke den Nutzungsfall repräsentierte. Der wesentliche Punkt liegt in der *Zusammenführung von Nutzungsfall und Gebäudetopologie* an zwei die Nutzung bestimmenden Prozessen:

Die Verbindung von

der Bewegung zwischen Räumen (Raumübergangsanforderung) und dem Raumübergang (1)
sowie von

Raumfunktionsnutzungsanforderung und Raumfunktionsangebot. (2)

In diesen Prozessen ist in dem hier vorgeschlagenen Modell der Abgleich bezüglich der Anforderungen des Nutzungsfalls und der Gegebenheit der Gebäudetopologie wesentlich. Dieser Punkt wird repräsentiert für (1) durch eine *Raumübergangstransition* und für (2) durch eine *Raumfunktionstransition*. Diese Transitionen des Topologie-Netzes haben Beschriftungen, die Nutzungsfall- und Gebäudetopologie-Netz verbinden. Das Bindeglied ist die Transitionsinformation der Beschriftung im Fall (1). Fall (2) wird anschließend erklärt.

(1)	$u:\text{move}(t) ; \quad \text{this}:\text{transition}(ID,t,u)$	abgekürzt: $u:m(t); \text{this}:t(ID,t,u)$
	Downlink zur Raumübergangstransition des Nutzungsfall-Elementnetzes (<i>u</i>) Downlink zur Raumübergangstransition des Gebäudetopologie-Systemnetzes (<i>this</i>)	

Der Parameter der Transitionsinformation t aus dem Synchronisationskanal m für *move* der Raumübergangstransition des Nutzungsfall-Elementnetzes und aus dem synchronen Kanal t für *transition*

der Raumübergangstransition mit der Identifikation *ID* des Gebäudetopologie-Systemnetzes wird mit einem Wert belegt. Dieser Wert ist eine konkrete Transitionsinformation in Form des Tupels $[from, barrier, type, to]$. Die vier Werte des Tupels entstammen dem Nutzungsfall-Elementnetz und dem Gebäudetopologie-Systemnetz und werden durch Unifikation⁴⁶ möglichst zusammengeführt. Diese Möglichkeit repräsentiert schließlich die Möglichkeit der Nutzung des Raumübergangs durch den Nutzungsfall. Gelingt die Unifikation, können die Raumübergangstransitionen des Gebäudetopologie-Systemnetzes und des Nutzungsfall-Elementnetzes schalten, und die Transitionsinformation (das Tupel) der Beschriftungen *move* bzw. *transition* werden mit den selben Werten belegt. Ist eine Unifikation nicht möglich, können die Transitionen nicht schalten, was die Unmöglichkeit des Raumübergangs repräsentiert. Anschaulich könnte z. B. die Barriereanforderung der Bewegungsabsicht (*move*) des Nutzungsfalls (Raumübergangsanforderung) nicht zusammengeführt werden können mit der Barriersituation dieses Raumübergangs (*transition*) der Gebäudetopologie.

Die Werte der Transitionsinformation der Raumübergangstransitionen von (i) Nutzungsfall-Elementnetz und (ii) Gebäudetopologie-Systemnetz werden durch Unifikation ermittelt. Für die Transition aus (ii) wird durch den Downlink $this.transition(id, t, u)$ ⁴⁷ die Transition mit passender Signatur des Regelwerks *Room Transition Definitions*⁴⁸ aktiviert. Die Transition ist schaltbereit, wenn Downlinks ihrer Beschriftung wiederum schaltbereite Transitionen adressieren. Durch Unifikation werden wie in 5.1.3 erläutert u. a. Werte für die Parameter für die Variablen *from*, *barrier*, *type* und *to* der Transitionsinformation ermittelt.

Für die Transition aus (i) wird durch den Downlink $u.move(t)$ die Transition mit passender Signatur des Regelwerks *Room Move Definition*⁴⁹ aktiviert. Dies führt zur Transition im Nutzungsfall-Elementnetz, die schaltbereit ist und liefert durch Unifikation Werte für die Parameter für die Variablen *from*, *barrier*, *type* und *to* der Transitionsinformation.

Die Unifikation der ermittelten Transitionsinformation führt im Erfolgsfall zur Ermittlung von Werten für einen möglichen Raumübergang, der dann auch durch Schalten der Raumübergangstransitionen von Nutzungsfall-Elementnetz und Gebäudetopologie-Systemnetz vollzogen wird. Kann der Unifikationsvorgang keine passenden Werte ermitteln, ist kein Übergang möglich und eine Nichterfüllung dieses im Nutzungsfall angeforderten Raumübergangs ist das Ergebnis dieses einzelnen Auswertungsschrittes.

(2)

$u:useFunction()$

Downlink zur
Raumfunktionstransition des
Nutzungsfall-Elementnetzes (*u*)

Im Fall (2) werden die Raumfunktionstransitionen des Gebäudetopologie-Systemnetzes und des Nutzungsfall-Elementnetzes zusammengeführt. Ein gemeinsames Schalten der Transitionen repräsentiert die Möglichkeit, dass eine vom Gebäude in einem Raum angebotene Funktion, wie vom Nutzungsfall gefordert, verwendet werden kann. Die Verbindung von Anforderung und Angebot wird repräsentiert durch folgende Modellelemente.

⁴⁶ Unifikation für Referenznetze wird in 4.4.2 erläutert.

⁴⁷ Die Variable *id* bezeichnet eine ganze Zahl, die die Transitionsidentifikation angibt, *t* bezeichnet das Tupel der Transitionsinformation und *u* den Nutzungsfall.

⁴⁸ Siehe Abbildung 16, S. 109 in 5.1.3.

⁴⁹ Das geschieht über das Regelwerk *Room Function Use and Move Definition*, wie in 5.1.4 beschrieben. Die Regelwerke sind in den Diagrammen der Abbildungen 26 und 28, S. 119 bzw. S. 120 dargestellt.

Das Gebäudetopologiemodell spezifiziert, wie in 5.1.2 und 5.1.3 erläutert, die Verortung eines Funktionsangebotes in einem Raum im Topologie-Netz und die Definition der angebotenen Funktionen des Raums im Spezifikationsnetz. Der Nutzungsfall definiert wie in 5.1.4 erklärt, welche Nutzungsart und welche Funktion in einem Raum gefordert ist. Die Gebäudenutzung wird auf dieser Grundlage repräsentiert durch einen synchronen Kanal *u:useFunction()*, der als Downlink der Raumfunktionstransition des Gebäudetopologie-Systemnetzes eine Transition des Regelwerkes *Room Function Use Definition* des Nutzungsfall-Elementnetzes adressiert.⁵⁰ Die Auswahl der Funktion und Nutzungsart erfolgt passend zur belegten Raum-Stelle und der direkt verbundenen und potenziell schaltbereiten Raumfunktionstransitionen des Nutzungsfall-Elementnetzes. Die aus der Beschriftung der Raumfunktionstransitionen durch Unifikation gewonnene Funktionsbezeichnung geht ein in die Synchronisation mit dem Funktionsangebot des Gebäudemodells.

Dies geschieht für (a) die *einfache Funktionsnutzung* durch den Downlink *this:use(function)* auf die potenziell schaltbereite Raumfunktionstransitionen im Nutzungsfall-Elementnetz und durch Downlink *building:singleUse(this,function)* auf die Transition *Room Use Definition* des Gebäudetopologie-Systemnetzes, dargestellt in Abbildung 37. Durch Unifikation von *function* wird die Funktionsbezeichnung gewonnen, deren Nutzung als möglich ermittelt wird.

Dieses Prinzip gilt auch für (b) die gemeinsamen Nutzungsarten, jedoch erfolgt dies in zwei Phasen.

Im Fall (b.1) der *gemeinsamen Nutzung durch eine festgelegte Anzahl an Teilnehmern ohne Rollenrelevanz* erfolgt die Gewinnung durch Unifikation von *function* mittels Downlinks im Nutzungsfall-Elementnetz⁵¹ auf eine potenziell schaltbereite Raumfunktionstransition mit dem Uplink *:joiningUse(<function>,n)* in Phase eins und *:joinedUse()* in Phase zwei, wobei *<function>* die Bezeichnung der angeforderten Funktionsbezeichnung ist, die für den Unifikationsprozess an dieser Stelle gewonnen wird, sowie mittels Downlinks *building:joiningUse(this,function,n)* und *building:joinedUse(this,function)* von Transitionen des Gebäudetopologie-Systemnetzes. Durch Unifikation von *function* wird die Funktionsbezeichnung gewonnen, deren Nutzung als möglich ermittelt wird.

Im Fall (b.2) der *gemeinsamen Nutzung durch Teilnehmer mit vorgegebenen Rollen* erfolgt dies mittels Downlinks im Nutzungsfall-Elementnetz⁵² auf eine potenziell schaltbereite Raumfunktionstransition mit dem Uplink *:joiningTeamUse(<function>)* in Phase eins und *:joinedTeamUse()* in Phase zwei, wobei *<function>* die Bezeichnung der angeforderten Funktionsbezeichnung ist, die für den Unifikationsprozess an dieser Stelle gewonnen wird, sowie mittels Downlinks *building:joiningTeamUse(this,function,role)* und *building:joinedTeamUse(this,function)* von Transitionen des Gebäudetopologie-Systemnetzes. Durch Unifikation von *function* wird die Funktionsbezeichnung gewonnen, deren Nutzung als möglich ermittelt wird.

Im Folgenden wird der Unifikationsprozess detaillierter erläutert.

Für (a) wird die Transition *Room Use Definition* des Gebäudetopologie-Systemnetzes mit dem Uplink *:singleUse(usecase,function)* adressiert (Abbildung 37), wobei die aus dem Nutzungsfall gewonnene Funktionsbezeichnung durch den Parameter *function* in den Unifikationsprozess dieser Transition übergeben wird. Gelingt die Unifikation durch den Downlink *use* zur Transition im Speicher *Room Use Definitions Memory*⁵³, bedeutet dies, dass die angeforderte Funktion vom Gebäude in dem Raum angeboten wird. Die in den Unifikationsprozess eingebundene Transition *Room Use Definition* des Gebäudetopologie-Systemnetzes und die des Nutzungsfall-Elementnetzes

50 Das geschieht über das Regelwerk *Room Function Use and Move Definition*, wie in 5.1.4 beschrieben. Die Regelwerke sind in den Diagrammen der Abbildungen 28 und 30, S. 119 bzw. S. 120 dargestellt.

51 Siehe Abbildung 30, S. 120.

52 Siehe Abbildung 30, S. 120.

53 Siehe Abbildung 20, S. 112.

können schalten, wodurch der im Elementnetz repräsentierte Nutzungsfallprozess einen neuen Zustand einnimmt, nämlich bezüglich des Ablaufs der Nutzung von Funktionen. Dies kann dargestellt werden durch die Task-Stellen, wie in 4.2.4 und Abbildung 31 gezeigt.

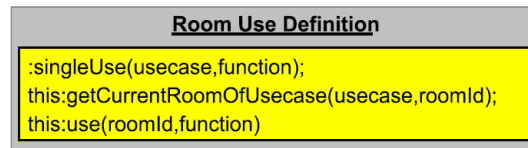


Abbildung 37: Regelwerk Room Use Definition

Für (b) ist der Unifikationsprozess insofern komplexer als der Vorgang zwei Phasen vorsieht: die Phase des Zusammenkommens und die Phase der gemeinsamen Nutzung. Wie in 5.1.4 erläutert, werden die Phasen im Nutzungsfall durch zwei durch einen Zwischenzustand verbundene Transitionen repräsentiert. Für jede der beiden Phasen erfolgt ein Unifikationsprozess.

Im Falle (b.1) wird in Phase eins die Transition im Regelwerk *Room Joined Use Definition* des Gebäudetopologie-Systemnetzes mit dem Uplink *:joiningUse(usecase,function,n)* (Abbildung 38) durch das Regelwerk *Room Function Use Definition*⁵⁴ adressiert, wobei die aus dem Nutzungsfall gewonnene Funktionsbezeichnung durch den Parameter *function* und die ebenso gewonnene Anzahl *n* an Teilnehmern in den Unifikationsprozess dieser Transition übergeben wird. In dieser Transition erfolgt ein Downlink *this:joiningToUse(roomId,function,n)* auf die Transition des Regelwerks *Room Joined Use* mit der in 5.1.3 erklärten Logik⁵⁵, die das Zusammenkommen der Teilnehmer beschreibt. Gelingt die Unifikation dieser Parameter, resultiert, dass die genannten Transitionen im Gebäudetopologie-Systemnetz und Nutzungsfall-Elementnetz synchron schalten können. Dies repräsentiert das erfolgte Hinzukommen zur gemeinsamen Funktionsnutzung. Im Nutzungsfall-Elementnetz führt dies im Regelwerk *Room Function Use Definition*⁵⁶ zum Übergang in den Zwischenzustand, der anzeigt, dass der Nutzungsfall im Zustand des Wartens auf die gemeinsame Nutzung ist. In Phase zwei wird die Transition im Regelwerk *Room Joined Use Definition* des Gebäudetopologie-Systemnetzes mit dem Uplink *:joinedUse(usecase,function)* adressiert. Der Wert für *function* entstammt dem Unifikationsprozess der Phase eins und stimmt dadurch mit der Funktionsanforderung des Nutzungsfall-Elementnetzes überein. In dieser Transition erfolgt ein Downlink *this:finishJoinedUse(roomId,function)* auf die Transition des Regelwerks *Room Joined Use* mit der in 5.1.3 erklärten Logik⁵⁷, die die abschließende gemeinsame Funktionsnutzung beschreibt. Ist die Unifikation möglich, können die genannten Transitionen im Gebäudetopologie-Systemnetz und Nutzungsfall-Elementnetz synchron schalten. Das Schalten repräsentiert die gemeinsame Nutzung der Funktion mit dem Wert *function*.

⁵⁴ Siehe Abbildung 30, S. 120.

⁵⁵ Siehe Abbildung 21, S. 113.

⁵⁶ Siehe Abbildung 30, S. 120.

⁵⁷ Siehe Abbildung 21, S. 113.

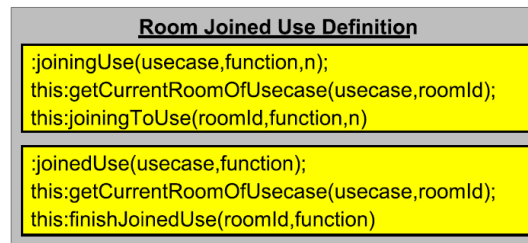


Abbildung 38: Regelwerk Room Joined Use Definition

Im Falle (b.2) wird in Phase eins die Transition im Regelwerk *Room Joined Team Use Definition* des Gebäudetopologie-Systemnetzes mit dem Uplink `:joiningTeamUse(usecase,function,role)` (Abbildung 39) durch das Regelwerk *Room Function Use Definition*⁵⁸ adressiert, wobei die aus dem Nutzungsfall gewonnene Funktionsbezeichnung durch den Parameter *function* in den Unifikationsprozess dieser Transition übergeben wird. Zusätzlich wird die Rolle *role*, die der Nutzungsfall vertritt, in den Prozess gegeben. In dieser Transition erfolgt ein Downlink `this:joiningForTeamUse(roomId,function,role)` auf die Transition des Regelwerks *Room Joined Team Use (Scenario)* mit der in 5.1.3 erklärten Logik⁵⁹, die das Zusammenkommen der Teilnehmer beschreibt. Gelingt die Unifikation dieser Parameter, resultiert, dass die genannten Transitionen im Gebäudetopologie-Systemnetz und Nutzungsfall-Elementnetz synchron schalten können. Dies repräsentiert das erfolgte Hinzukommen zur gemeinsamen Funktionsnutzung. Im Nutzungsfall-Elementnetz führt dies im Regelwerk *Room Function Use Definition*⁶⁰ zum Übergang in den Zwischenzustand, der anzeigt, dass der Nutzungsfall im Zustand des Wartens auf die gemeinsame Nutzung ist. In Phase zwei wird die Transition im Regelwerk *Room Joined Team Use Definition* des Gebäudetopologie-Systemnetzes mit dem Uplink `:joinedTeamUse(usecase,function)` adressiert. Der Wert für *function* entstammt dem Unifikationsprozess der Phase eins und stimmt dadurch mit der Funktionsanforderung des Nutzungsfall-Elementnetzes überein. In dieser Transition erfolgt ein Downlink `this:finishJoinedTeamUse(roomId,function)` auf die Transition des Regelwerks *Room Joined Team Use (Scenario)* mit der in 5.1.3 erklärten Logik⁶¹, die die abschließende gemeinsame Funktionsnutzung beschreibt. Ist die Unifikation möglich, können die genannten Transitionen im Gebäudetopologie-Systemnetz und Nutzungsfall-Elementnetz synchron schalten. Das Schalten repräsentiert die gemeinsame Nutzung der Funktion mit dem Wert *function*.

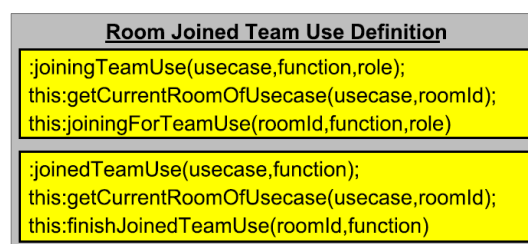


Abbildung 39: Regelwerk Room Joined Team Use Definition

Gelingt in einem Fall die Unifikation nicht, repräsentiert dies die Unmöglichkeit der Funktions-

58 Siehe Abbildung 30, S. 120.

59 Siehe Abbildung 22, S. 115.

60 Siehe Abbildung 30, S. 120.

61 Siehe Abbildung 22, S. 115.

nutzung in diesem Fall, weil ein Angebot für die geforderte Funktion in diesem Raum nicht aufgefunden werden kann, oder aber die Teilnehmer im Falle gemeinsamer Nutzung nicht zusammengefunden haben. Letzteres kann auch durch die Gebäudetopologie verursacht sein.

Die Gebäudenutzung erfordert die Erfüllung von Voraussetzungen und hat einen Prozess der Initiierung. Zunächst sei das Regelwerk erklärt, welches die Voraussetzungen schafft, im Anschluss wird das Regelwerk der Initiierung erläutert. Das *Regelwerk zur Herstellung der Voraussetzungen* besteht aus zwei Referenznetzen, die den Abschluss der Spezifikationen im Spezifikationsnetz steuern. Das Netz *Room Transition and Room Use Definitions of the Building defined* (Abbildung 40) beschreibt die Definition des Gebäudetopologiemodells, d. h. aller Räume mit Raumidentifikationen, Raumbezeichnungen, Raumkapazitäten, Raumbelegungen und Raum-Funktionen und aller Raum-Übergänge mit Identifikationen, Übergangstypen und Barriereangaben (*Room Transition Types and Barrier Definitions defined*). Der Abschluss wird durch Schalten der Transition *Finish Building Definition* bestätigt und im Zustand *Building defined* vermerkt. Das Netz *Room Access Definitions (Transition Allowness Definitions)* (Abbildung 41) repräsentiert die Definition der Zugangsberechtigungen von Übergangstransitionen für Rollen. Hierzu werden zu den Transitions-identifikationen die Rollen in eine Erlaubnis- oder Verbotsrelation unter Verwendung des Speichers *Room Access Definitions Memory (Transition Allowness Definitions)*⁶² des Rahmenwerkes gesetzt. Der Abschluss wird im Zustand *Room Access defined* vermerkt.

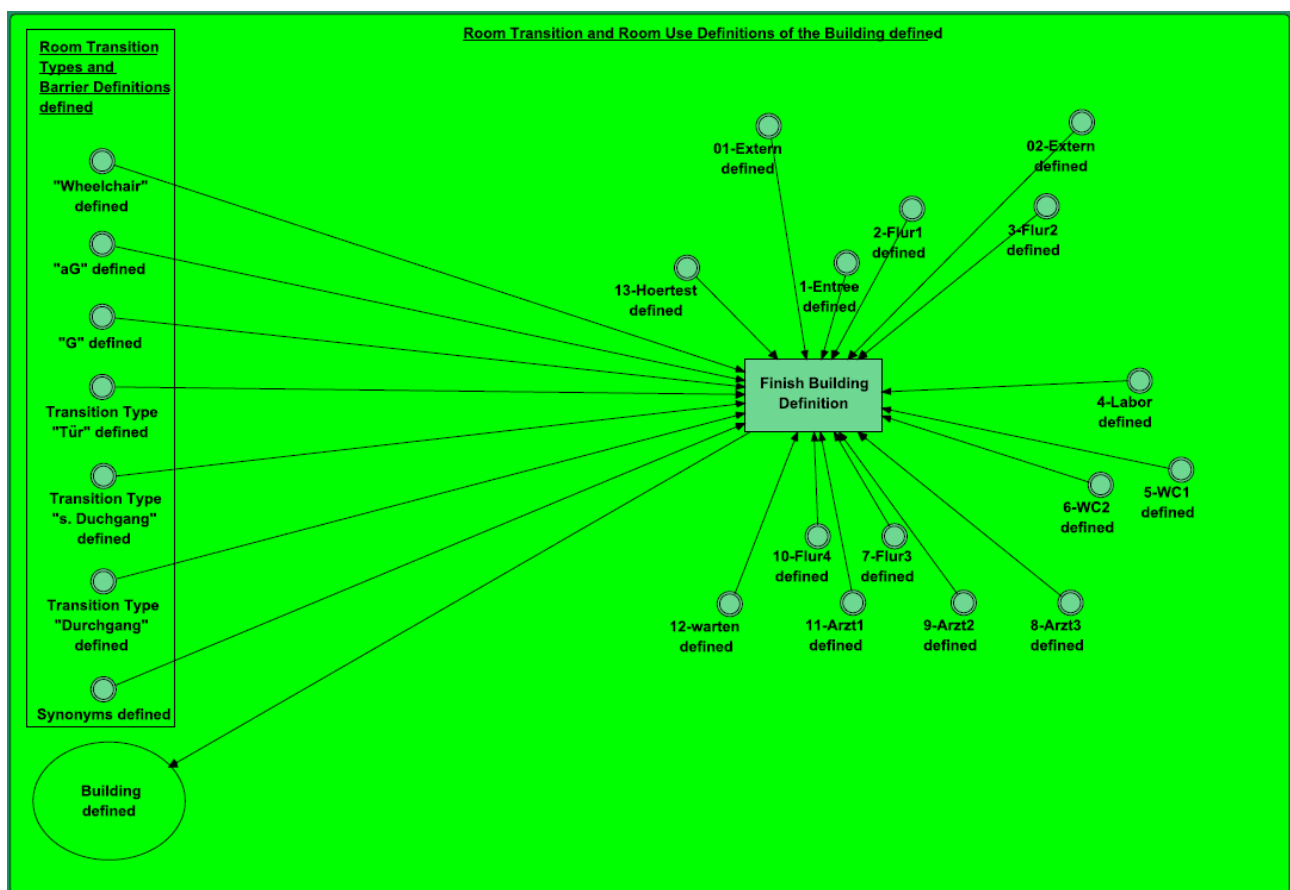


Abbildung 40: Netz Room Transition and Room Use Definitions defined, Beispiel

62 Siehe Abbildung 19, S. 111.

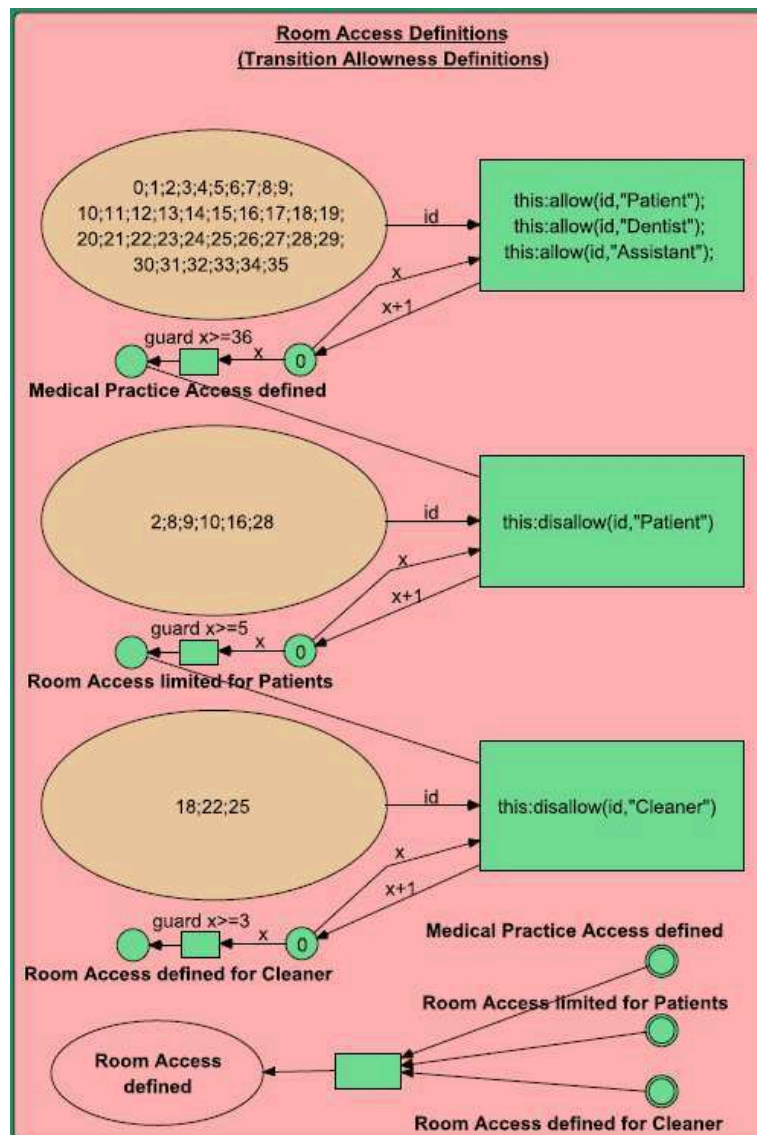


Abbildung 41: Netz Room Access Definitions (Transition Allowness Definitions), Beispiel

Sind beide Zustände *Building defined* und *Room Access defined* als definiert markiert, sind die Voraussetzungen für die Gebäudenutzung gegeben.

Das *Regelwerk zur Initiierung der Gebäudenutzung* beschreibt die Zusammenführung von Nutzungsfall und Gebäudetopologie und wird im Modell durch ein Referenznetz repräsentiert. Dieses Referenznetz hat folgende Aufgaben:

1. Initiierung der *gemeinsamen Nutzung durch Teilnehmer mit vorgegebenen Rollen*
2. Erzeugung, Initiierung und Aktivierung von *Nutzungsfällen als Referenznetze*
3. Einbringen der *Nutzungsfälle als Elementnetze in das Gebäudetopologie-Systemnetz*.

In Abbildung 42 ist ein Beispiel dargestellt.

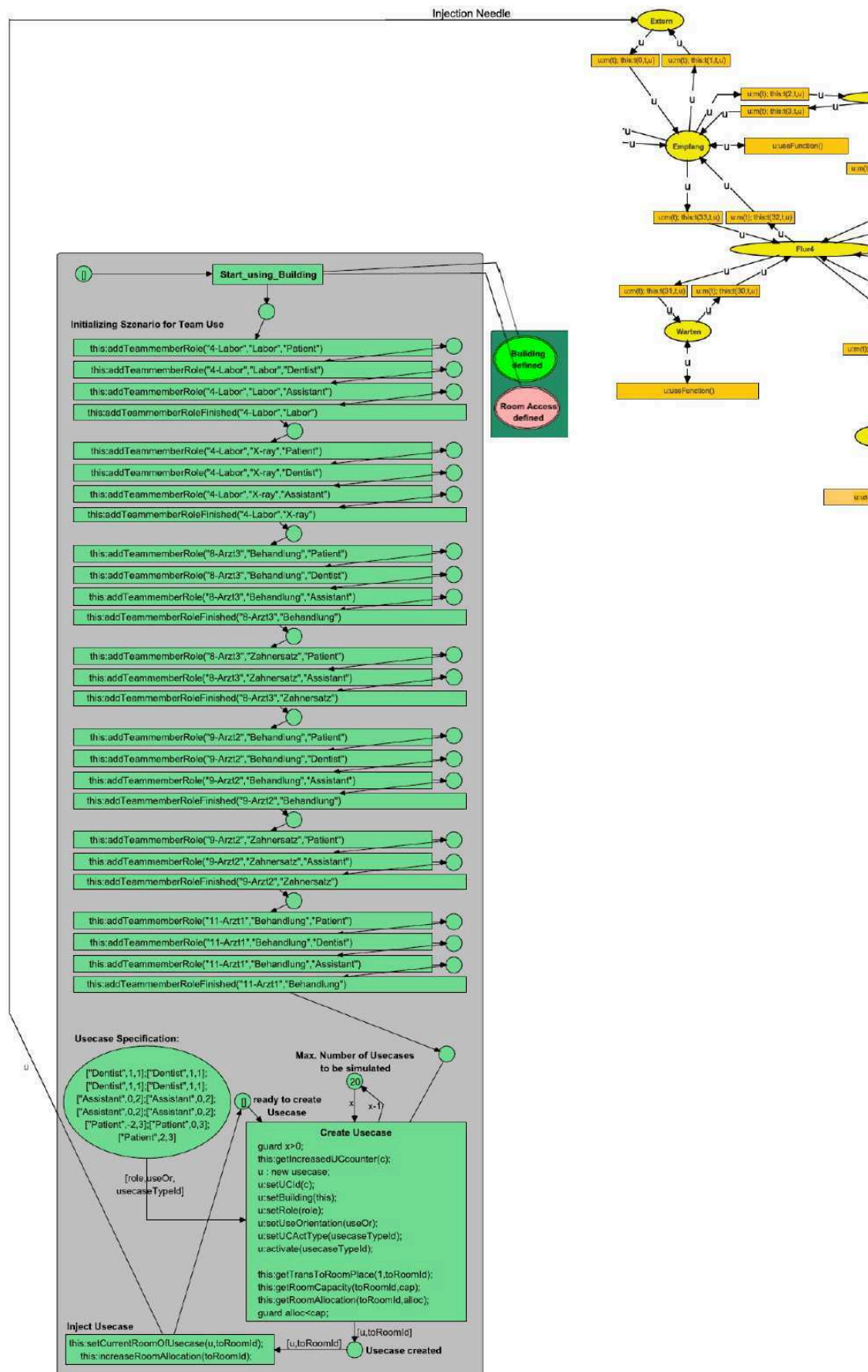


Abbildung 42: Regelwerk zur Initiierung der Gebäudenutzung, Beispiel

Zum ersten Punkt erfordert das Gebäudetopologiemodell, dass für die Nutzung vorgesehene Raumfunktionen vor der Gebäudenutzung spezifiziert sind. Im Falle der *gemeinsamen Nutzung durch Teilnehmer mit vorgegebenen Rollen* sind die Teilnehmerrollen zu definieren. Dies erfolgt nach vollständiger topologischer Spezifikation inklusive Zuordnung von Funktionen zu Räumen in der Herstellung der Voraussetzungen. Die Spezifikation der Rollen für die gemeinsame Nutzung ist eine darauf aufbauende Information, die der Nutzung des Gebäudes zugeordnet ist und daher an dieser Stelle erfolgt.

Der zweite Punkt beschreibt die Erzeugung, Initiierung und Aktivierung von *Nutzungsfällen als Referenznetze*. Hierzu kann die Anzahl an für die Gebäudenutzung simultan zu betrachtenden Nutzungsfällen definiert werden. Eine Instanz eines Nutzungsfallnetzes wird erzeugt und mit einer fortlaufenden Identifikationsnummer aus dem Speicher *Usecase Counter Memory* des Rahmenwerkes versehen. Diese Identifikationsnummer ist eindeutig und wird verwendet für die Steuerung der Zugangsberechtigung. Wie in 5.1.4 erklärt, ist einem Nutzungsfallnetz eine Typ-Identifikation zuzuordnen, die eines der Nutzungstopologie-Netze des Nutzungsfallnetzes identifiziert, welches die Anforderung des Nutzungsfalls nun in der Gebäudenutzung spezifizieren soll. Diese Typ-Identifikation muss für die Aktivierung des Nutzungsfallnetzes festgelegt werden. Mit dem Parameterpaar *[role,useOr,usecaseTypeId]* wird für den Nutzungsfall mit der Typ-Identifikation *usecaseTypeId* die Rolle *role* und Nutzungsausprägung *useOr* in der Gebäudenutzung definiert. Die *Nutzungsausprägung* beschreibt mit einer negativen ganzen Zahl für *useOr* einen bewegungsorientierten Nutzungsfall, der umso bewegungsorientierter ist, je kleiner die Zahl. Durch eine positive ganze Zahl als Wert für *useOr* wird ein funktionsorientierter Nutzungsfall definiert, der umso funktionsorientierter ist, je größer die Zahl. Der Wert Null für *useOr* spezifiziert einen bezüglich der Nutzungsausprägung neutralen Nutzungsfall. Dem Nutzungsfallnetz wird eine Referenz auf das Gebäudetopologie-Netz⁶³ im *Building Registration Memory*⁶⁴ zugeordnet, welche im Nutzungsfallnetz, wie in 5.1.4 erläutert, in den Regelwerken Regelwerk *Room Move Definition*⁶⁵ und *Room Funktion Use Definition*⁶⁶ für den Raumübergang und die Raumfunktionsnutzung verwendet wird. Die Aktivierung des Nutzungsfalls spezifiziert den Typ des Nutzungsfalls, also das zu aktivierende Nutzungstopologie-Netz. Abschließend wird die Verortung des Nutzungsfalls im Gebäude festgelegt und geprüft, ob die Raumkapazität die Belegung mit dem Nutzungsfall zulässt. Ist dies möglich, wird die Raumbelegung um den Nutzungsfall erhöht.

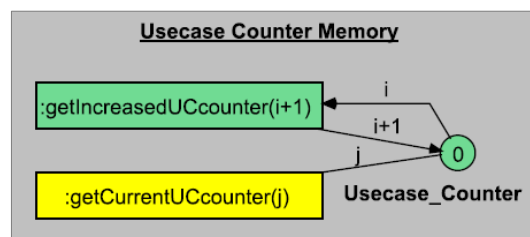


Abbildung 43: Speicher Usecase Counter Memory

Der dritte Punkt beschreibt das Einbringen der *Nutzungsfälle als Elementnetze in das Gebäudetopologie-Systemnetz*. Genauer werden Instanzen von Nutzungsfall-Elementnetzen erzeugt und Referenzen auf diese als Objektmarken in das Gebäudetopologie-Systemnetz eingebracht. Die

⁶³ Vergleiche Definition in 5.1.2.

⁶⁴ Siehe Abbildung 34, S. 123.

⁶⁵ Siehe Abbildung 26, S. 118.

⁶⁶ Siehe Abbildung 30, S. 120.

Gebäudenutzung wird repräsentiert durch eine Referenz auf ein Nutzungsfall-Elementnetz, welche als Markenobjekt die Raum-Stellen des Gebäudetopologie-Systemnetzes durch gemeinsames Schalten der Raumübergangstransitionen bzw. Raumfunktionstransitionen durchläuft, und zwar entsprechend den Anforderungen, die im Nutzungsfall-Elementnetz definiert sind. Das Einbringen wird repräsentiert durch das Schalten der Transition *Inject Usecase*, wodurch die Referenz auf das Nutzungsfall-Elementnetz in die Raum-Stelle abgelegt wird, die von der Transition durch die ausgehende Kante *Injection Needle* erreicht wird. Anschaulich wird der Nutzungsfall in die Gebäudetopologie in einen bestimmten Raum eingespritzt. Die Beschreibung der gewünschten Bewegung und Nutzung von Raumfunktionen im Elementnetz bestimmt seine Navigation durch das Systemnetz der Gebäudetopologie, angetrieben durch Schaltvorgänge des Systemnetzes.

5.2 Einordnung des Modells und Anknüpfungspunkte an BIM / IFC

Für die Modellierung von Gebäuden ist Building Information Modeling der gegenwärtige Ansatz, die für die Phasen des Entwurfs, der Planung, Ausführung und Bewirtschaftung sowie Umbau relevanten Informationen auf ein durchgehend nutzbares Modell abzubilden⁶⁷. Die hier vorgestellte Methode ist Basis eines Vorgehens, welches sich einordnen lässt in diese Phasen. In 5.3.3 wird gezeigt, dass die Modellierungsmethode für den nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurf mit einem Modell ausgestattet ist, dass insbesondere die Phasen Entwurf, Planung und Umbau hinsichtlich der Nutzung unterstützt. Basis ist das in 5.1 vorgestellte Modell. Die Entwurfsbereiche Gestaltung, Geometrie und Technik werden durch diese Methode nicht abgedeckt. Für ein Vorgehen im Sinne von BIM ist aber ein integrativer Ansatz erforderlich. Die Vorteile werden auch im Zusammenhang mit der Beschreibung des Vorgehens zur Modellierung mit dieser Methode zur Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs in 5.3.3 beschrieben. Daher werden in diesem Abschnitt die am Modell orientierten Anknüpfungspunkte zwischen diesem Ansatz und BIM skizziert. Folgende Intention wird hierbei verfolgt:

- Vorschlag einer Abbildung zwischen dem Modell der Gebäudetopologie dieses Ansatzes bestehend aus Raum-Stelle, Raumübergangstransitionen und Raumfunktionstransitionen sowie den verbindenden Kanten und ausgewählten Klassen der IFC auf der Basis der Dokumentation [IFC4A2 2016]. Im Gebäudetopologiemodell wird die für die Modellierung der Gebäudenutzung relevante semantische Objektbeschreibung abgebildet. Der Bezug zur geometrischen Beschreibung bzw. die Repräsentation erfolgt im BIM-Modell, welches selbst auch eine Trennung zwischen der semantischen Beschreibung eines Bauteils oder Gebäudes und seiner geometrischen Repräsentation vorsieht. Die Abbildung sollte entsprechend zwischen dem Gebäudetopologiemodell und den Klassen des IFC-Schemas für die semantische Beschreibung erfolgen [BIM 2015], S. 100 f.. Es handelt sich um Klassen des IFC-Schemas *Product Extension* [BIM 2015], S. 88 f..
- Hierbei werden Unterschiede der Modellbildung erläutert, die besonders behandelt werden müssen.
- Es wird ein Ansatz zur Integration auf Basis dieser Abbildung vorgeschlagen, um ein Gebäudetopologiemodell mit Informationen aus einem BIM-Modell zu erstellen oder fortzuschreiben und umgekehrt.

Die Modelle der Nutzung, des Nutzungsfalls und der Gebäudenutzung sind für die Abbildung nicht relevant, weil sie keinen direkten Bezug zum Gebäude außer über das Gebäudetopologiemodell haben.

⁶⁷ Phasen des Lebenszyklus eines Gebäudes nach [BIM 2015], S. 4; vergleiche auch Abbildung 46, S. 153 in 5.3.3.

Die vorgeschlagene Abbildung zwischen Gebäudetopologiemodell und IFC ist in Abbildung 44 veranschaulicht, die Diagrammdarstellungen sind orientiert an [IFC4A2 2016-Diagr]. Die Abbildung zeigt drei Schichten, wobei alle Schichten den Ausschnitt des jeweiligen Metamodells zeigen, auf dessen Basis Gebäudemodelle repräsentiert werden. Die Abbildung wird auf Typ- bzw. Klassen-Ebene abstrahiert und nicht auf Instanzebene eines konkreten Gebäudemodells beschrieben. Die obere Schicht zeigt die Typen von Objekten, die Teil eines Topologie-Netzes sind. Die mittlere Schicht stellt die relevanten Modellelemente des Rahmenwerkes des Gebäudetopologie-Netzes dar. Die unten dargestellte Schicht zeigt die relevanten Klassen der IFC, die für die Abbildung passend erscheinen.

Der Zusammenhang der oberen beiden Schichten des Gebäudetopologiemodells ist in 5.1.2 beschrieben und wird hier lediglich veranschaulicht. Die fein gepunkteten Linien zeigen die beschriebenen Zusammenhänge. Für die Abbildung zwischen dem Gebäudetopologiemodell und IFC ist der Zusammenhang zwischen den oberen beiden Modelldarstellungen und den IFC-Klassen der unten dargestellten Schicht interessant. Dieser Zusammenhang wird durch lang-kurz-gestrichelte Linien dargestellt. Für die folgenden Beschreibungen wird zur Veranschaulichung ein repräsentativer Ausschnitt aus einem Topologie-Netz betrachtet, der aus einer Raum-Stelle, verbunden über eine ausgehende Kante mit einer Raumübergangstransition, verbunden über eine ausgehende Kante mit einer zweiten Raum-Stelle, besteht. Die zweite Raum-Stelle ist beispielhaft verbunden mit einer Raumfunktionstransition, deren Abbildung später besprochen wird.

Es wird eine Abbildung zwischen einer *Raum-Stelle* und der IFC-Klasse *IfcSpace* vorgeschlagen. Dies ist eine übereinstimmende Sicht zwischen dem Modellierungsgegenstand des Gebäudetopologie-Modells⁶⁸ und der IFC: „A space represents an area or volume bounded actually or theoretically. Spaces are areas or volumes that provide for certain functions within a building.“ [IFC4A2 2016-Space]. Umfassendere Raumstrukturen wie *IfcBuildingStorey* erforderten eine Bildung von Sub-Petrinetzen an einer Raum-Stelle. Dies ist in dem Gebäudetopologiemodell dieser Methode nicht vorgesehen. Entsprechend der IFC Dokumentation zu *IfcSpace* [IFC4A2 2016-Space] lassen sich folgende Attribute für eine Abbildung nutzen:

- „*Name* holds the unique name (or space number) from the plan.
- *Description* holds any additional information field the user may have specified, there are no further recommendations.
- *LongName* holds the full name of the space, it is often used in addition to the *Name*, if a number is assigned to the room, then the descriptive name is exchanged as *LongName*.
- *ObjectType* holds the space type, i.e. usually the functional category of the space.“

Die einer Raum-Stelle zugeordnete Raumidentifikation, Kapazität und Belegung werden mit sogenannten Properties von *IfcSpace* in eine Abbildungsbeziehung gesetzt. Diese Properties, d. h. Attribute, die in den IFC als Merkmale oder Eigenschaften bezeichnet werden, werden *IfcSpace* zusammengefasst in einem *Property Set* [IFC4A2 2016-PropSet] zugeordnet.

Die *Raumidentifikation* der Raum-Stelle und eine *Property Name* von *IfcSpace* können bijektiv aufeinander abgebildet werden. Die Raumidentifikation wird dem *Room Place Definitions Memory*⁶⁹ entnommen, welcher die Identifikationen der im Topologie-Netz vorhergehenden und nachfolgenden Raum-Stellen der verbundenen Raumübergangstransition speichert. In der Abbildung 44 ist dieser Speicher zweimal dargestellt, um übersichtlicher zu zeigen, dass für die linke Raum-Stelle die Identifikation dem Speicher *Room Place preceding a Transition* entstammt und für die rechte

⁶⁸ Vergleiche 4.2 und 5.1.2.

⁶⁹ Siehe Abbildung 4, S. 98.

Raum-Stelle die Identifikation dem Speicher *Room Place succeeding a Transition* entnommen wird. Im BIM-Modell können diese Identifikationen in Objekten von Unterklassen der Klasse *IfcSimpleProperty* gespeichert werden, etwa *IfcPropertySingleValue*.

Die *Kapazität* bzw. die *Belegung*, die auch im Speicher *Room Place Definitions Memory* in den Speichern *Room Capacity Memory* bzw. *Room Allocation Memory* gespeichert wird⁷⁰, kann entsprechend auf Attribute vom Typ *IfcSimpleProperty* abgebildet werden. Dies entspricht der Definition von *IfcSpace*, die vorsieht, dass das *Property Set Pset_SpaceOccupancyRequirements* zugeordnet werden kann, vergleiche [IFC4A2 2016-Space], Abschnitt Property Sets for Objects, Table 68, Eintrag *Pset_SpaceOccupancyRequirements*. Dies umfasst die Eigenschaften *OccupancyNumberPeak* und *OccupancyNumber*, die für die Abbildung der Kapazität bzw. Belegung genutzt werden können. Die Semantik der Eigenschaften entspricht auch der Semantik in diesem Modell [IFC4A2 2016-Occu]. Der Sinn der Speicherung der Kapazität wird darin gesehen, aus dieser Angabe die geometrischen Dimensionen innerhalb des BIM-Modells abzuleiten und umgekehrt aus Dimensionen Kapazitätsvorgaben für die Simulation der Gebäudenutzung zu erzeugen. Zur Berechnung kann die Eigenschaft *AreaPerOccupant* herangezogen werden.

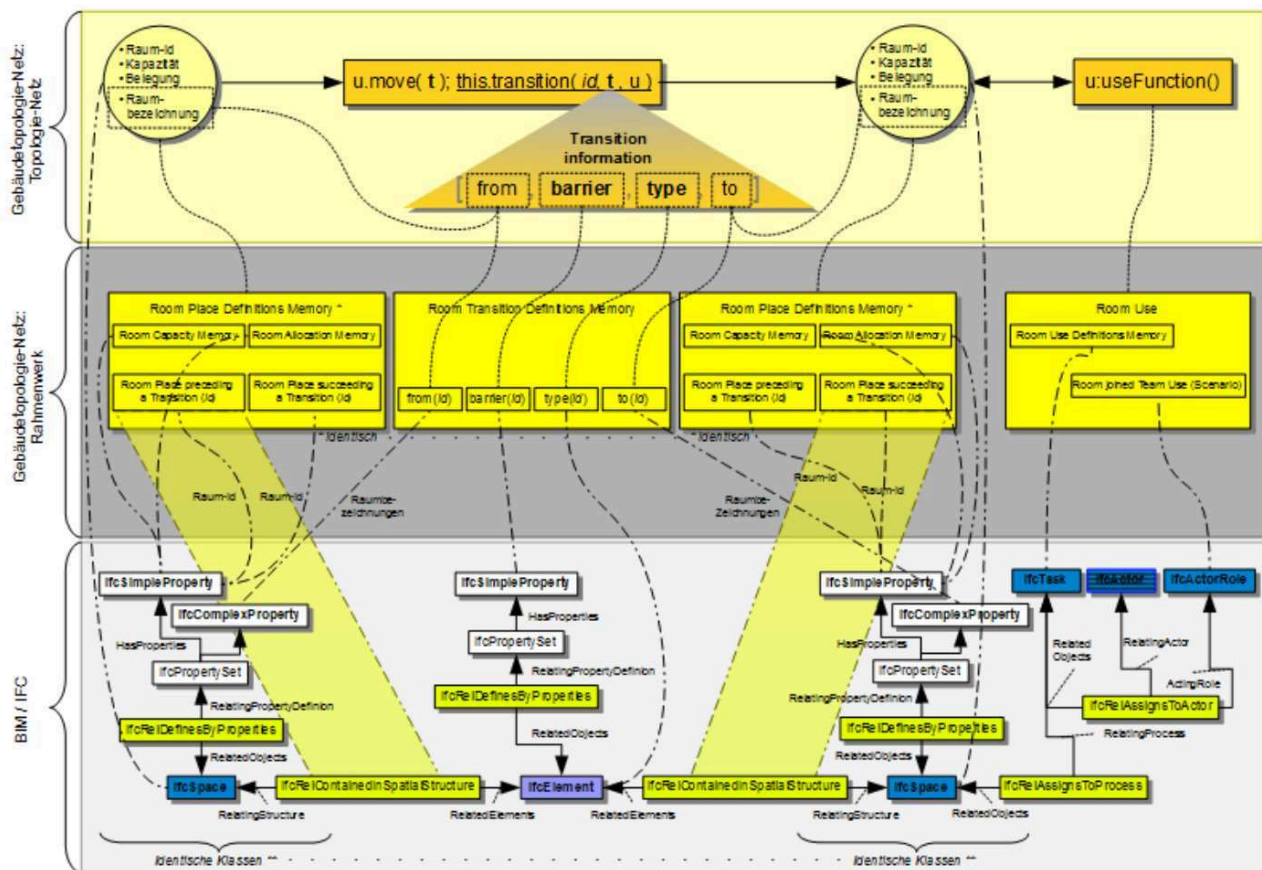


Abbildung 44: Einordnung und Anknüpfungspunkte an BIM / IFC

Für eine *Raumübergangstransition* werden der *Übergangstyp* aus dem *Room Transition Definitions Memory* und eine Unterklasse von *IfcElement* bijektiv abgebildet, also z. B. eine Abbildung zwischen dem *Übergangstyp Door* und *IfcDoor* oder *Stair* und *IfcStair*. Für die in 5.1.2 dargestellten

⁷⁰ Siehe Abbildungen 5 und 6, S. 99.

besonderen Objekte der Gebäudetopologie müssen geeignete Klassen zugeordnet werden, etwa *IfcTransportElement*. Die *Barriereangabe* für eine Tür kann auf ein Attribut vom Typ *IfcSimpleProperty* bijektiv abgebildet werden. Gemäß der Definition von *IfcDoor* könnte das *Property Set Pset_DoorCommon* zugeordnet werden, vergleiche [IFC4A2 2016-Door], Abschnitt *Property Sets*, Table 119, Eintrag *Pset_DoorCommon*. Dies umfasst die Eigenschaft *HandicapAccessible*, die für die Abbildung der Barriereangabe genutzt werden könnte, allerdings nur als Wahrheitswert, der angibt, „ob die Tür behindertengerecht gemäß der nationalen oder regionalen Verordnung ist (JA), oder nicht (NEIN).“ [IFC4A2 2016-DoorCom]. Soll es eine differenziertere Abbildung zwischen der Barriereangabe des Gebäudetopologiemodells und einer Property im BIM/IFC-Modell geben, was im Sinne des Informationserhalts wünschenswert ist, dann sollte, wie in [BIM 2015], S. 112 f. vorgeschlagen, auf Objektebene ad hoc eine Property zugewiesen werden, etwa eine *IfcSimpleProperty* mit dem Namen *Barriere*, der Beschreibung *Klassifiziert die Barrierefreiheit des Raumübergangs* und einem Nominalwert aus einem genormten Satz an Werten. Die Barriereangabe der Raumübergangstransition muss bijektiv abgebildet werden, wenn ein Informationserhalt bei der Abbildung zwischen den Modellen der Gebäudetopologie und BIM bestehen soll.

Die Abbildung zwischen einer *Raumübergangstransition* und IFC bezieht auch *IfcSpace* ein, weil im Gebäudetopologiemodell die Definitionen des Raumübergangs die Raumbezeichnungen für den Herkunftsraum und den Zielraum des Übergangs umfassen.⁷¹ Die *Raumbezeichnungen des Herkunftsraums* können zwischen dem Speicher *from* des *Room Transition Definitions Memory*⁷² und den Properties des *IfcSpace* bijektiv abgebildet werden. Dazu werden alle Raumbezeichnungen des Speichers *from* der Raumübergangstransition abgebildet auf *IfcComplexProperty* des *IfcPropertySet*, dessen *IfcSpace*-Objekt die Beziehung *IfcRelContainedInSpatialStructure* mit demjenigen *IfcElement*-Objekt hat, welches in einer Abbildungsbeziehung mit dem Typ jener Raumübergangstransition steht [IFC4A2 2016-Contain]. Die Beziehung *IfcRelContainedInSpatialStructure* hat hier also ihre Entsprechung im Speicher *Room Place preceding a Transition*. Die Raumbezeichnungen können in dem *IfcComplexProperty* als eine oder mehrere *IfcSimpleProperty* abgebildet werden, z. B. als *IfcPropertySingleValue*. Ideal wäre eine Referenzierung auf Raumbezeichnungen, die aus einer vordefinierten Begriffshierarchie stammen. Diese Abbildung kann so, wie oben zur Barriereangabe beschrieben, ad hoc auf Objektebene erfolgen. Die Abbildungsbeziehung für die *Raumbezeichnungen des Zielraums* einer Übergangstransition ist entsprechend gedacht.

Das *Funktionsangebot eines Raums* wird, wie in Abbildung 44 dargestellt, im Gebäudetopologie-Netz durch eine *Raumfunktionstransition* repräsentiert, die durch eine bidirektionale Kante mit der zugehörigen Raum-Stelle verbunden ist. Das Gebäudetopologiemodell sieht für die Speicherung der angebotenen und im Spezifikationsnetz spezifizierten Funktionen den Speicher *Room Use Definitions Memory*⁷³ vor. Es wird vorgeschlagen, eine Abbildung zwischen diesem Speicher und IFC-Klassen zu definieren, für die eine Beziehung mit *IfcSpace* definierbar ist. Abzubilden sind die Entitäten *Funktion* eines Raums und *Benutzerrolle* für die gemeinsame Nutzung (*Room joined Team Use*) unter Einbeziehung von Nutzerrollen. Die IFC haben keine Repräsentation für den Modellierungsgegenstand *Funktion eines Raums* vorgesehen. Eine Abbildung auf bestehende Klassen kann nur ein übergangsweiser Modellierungsvorschlag sein, der durch eine Erweiterung

71 Diese Besonderheit hängt mit den erläuterten Modellen der Nutzung und Gebäudenutzung zusammen, wie in 5.1.3 und 5.1.5 beschrieben. Zusammengefasst erlaubt das Gebäudetopologiemodell die Vergabe von mehreren Raumbezeichnungen für den Herkunfts- und für den Zielraum, die zusammen mit der zugehörigen Übergangstransition gespeichert werden, so dass die Unifikation der Bewegungsanforderung des Nutzungsfalls mit Synonymen und Ober- bzw. Unterbegriffen der Raumbezeichnungen funktioniert.

72 Siehe Abbildung 10, S. 102.

73 Siehe Abbildung 20, S. 112.

des Standards ersetzt werden sollte. Die Nutzung einer angebotenen *Funktion eines Raums* hat den Charakter eines Prozesses. Daher wird eine Abbildung der *Funktion* auf die Klasse *IfcTask* des IFC-Schemas *IfcProductExtension* vorgeschlagen. Die Klasse hat im Rahmen der Gebäudemodellierung einen anderen Modellierungsschwerpunkt: „A task is typically used to describe an activity for the construction or installation of products, but is not limited to these types. For example it might be used to describe design processes, move operations and other design, construction and operation related activities as well.“, Abschnitt Entity Definition, [IFC4A2 2016-Task]. Sie kann demnach auch für andere Raum-bezogene Aktivitäten verwendet werden; als Beispiel wird ein Umzug einer Personengruppe oder einer Organisation von einem Ort zu einem anderen genannt. „IfcTask can also be used to describe an activity that moves people, groups within an organization or complete organizations together with their associated furniture and equipment from one place to another.“, Abschnitt Representation of other activities, [IFC4A2 2016-Task]. In diesem Fall ist die *IfcTask* über die Beziehung *IfcRelAssignsToProcess* mit dem Ort zu verbinden, von dem der Umzug ausgeht. Dieser Fall kommt dem Modellierungsgegenstand nahe, so dass eine Abbildung zwischen *Raum-Stelle* und *IfcSpace* sowie der angebotenen *Funktion* und *IfcTask* vorgeschlagen wird, wobei *IfcSpace* und *IfcTask* über die Beziehung *IfcRelAssignsToProcess* verbunden sind und damit die bidirektionale Kante zwischen Raum-Stelle und Raumfunktionstransition repräsentiert wird, wie in Abbildung 44 dargestellt. Es kann dann eine Abbildung zwischen der *Benutzerrolle für eine Funktion* und *IfcActorRole* erfolgen, wobei letztere mit *IfcTask* über die Beziehung *IfcRelAssignsToActor* verbunden ist [IFC4A2 2016-AssAct]. Diese Abbildung geschieht mit *Initializing Szenario for Team Use* im *Regelwerk zur Initiierung der Gebäudenutzung* der Transition *Start using Building*.⁷⁴ Die Abbildung erfolgt in einem konkreten Gebäudetopologiemodell zwischen den im Modell der Gebäudenutzung definierten Funktionen von Räumen mit ihren Benutzerrollen und den Objekten der Klassen *IfcTask* mit *IfcActorRole*. Anzumerken ist, dass ein konkreter Nutzer, wie durch *IfcActor* darstellbar, im hier vorgeschlagenen Gebäudetopologiemodell nicht repräsentiert wird. Daher ist diese Klasse in der Abbildung 44 gestreift markiert. Eine zukünftige Abbildbarkeit wäre gegeben.

Anknüpfend an die Darstellung besonderer Objekte der Gebäudetopologie in 5.1.2 wird am Beispiel des Aufzugs⁷⁵ deutlich, dass es in diesem Sonderfall eine Abweichung zwischen der priorisierten Repräsentation der Aufzugsanlage inkl. Kabine als *Raum-Stelle* mit *Raumübergangstransitionen für jedes angefahrene Geschoss* im Gebäudetopologiemodell⁷⁶ und der im IFC-Standard vorgesehenen Repräsentation als *IfcTransportElement* gibt [IFC4A2 2016-TransEl]. Ein Aufzug wäre nach dem IFC-Standard also als *IfcElement* und damit gemäß der oben dargestellten Abbildung als *Raumübergangstransition* im Gebäudetopologie-Netz zu modellieren. Dies ist aber für die Modellierung der Gebäudetopologie aufgrund der höheren strukturellen Komplexität des Topologie-Netzes und der fehlenden Möglichkeit der Repräsentation der Kapazität der Aufzugskabine die unpassendere Repräsentation. In solch einem Sonderfall kann nur eine manuelle Abbildung durch den Modellierer möglichst mit Werkzeugunterstützung helfen. In diesem Fall kann eine Abbildung der Aufzugsanlage inkl. Kabine von einer *Raum-Stelle* auf ein *IfcTransportElement* manuell erfolgen, wobei die *Kapazität* als neue *IfcSimpleProperty* des *IfcTransportElement* abgebildet werden sollte. Immerhin kann diese Property im Zusammenhang mit den Abmessungen des Aufzugs aus *Pset_TransportElementElevator*, also *ClearWidth*, *ClearDepth* und *ClearHeight* genutzt werden. Die *Raum-Stelle* wird dann zusammen mit allen Raumübergangstransitionen der Geschosse auf ein *IfcTransportElement*-Objekt abgebildet. Dieses Objekt muss dann einem *IfcSpace*-Objekt im BIM-Modell zugeordnet werden. Die umgekehrte Abbildung erfordert die Erzeugung der

⁷⁴ Dies ist als Bestandteil des Modells der Gebäudenutzung in 5.1.5 beschrieben.

⁷⁵ Siehe Nr. (iv) und (viii) in Tabelle 15, S. 107 und Abbildung 15, S. 108.

⁷⁶ Siehe oben genannte Nr. (iv).

Raum-Stelle und Raumübergangstransitionen aus der Repräsentation der Aufzugsanlage als *IfcTransportElement*. Umfasst das BIM-Modell die Informationen für die anzufahrenden Geschosse, ist eine Abbildung auf die Raumübergangstransitionen für die Geschosse mit Anbindung der Transitionen an die den Geschossen entsprechenden Raum-Stellen möglich.

Aufbauend auf die dargestellten Abbildungsmöglichkeiten ist die Integration der in dieser Arbeit vorgestellten und prototypisch realisierten Werkzeugunterstützung der Modellierungsmethode für den nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurf der nächste notwendige Schritt. Diese Integration sollte mit einem BIM-Entwurfswerkzeug auf Basis der IFC erfolgen. Sie ist aber nicht Bestandteil dieser Arbeit. Im Folgenden werden aber die Realisierungsansätze dargestellt, um ein Gebäudetopologiemodell mit Informationen aus einem BIM-Modell zu erstellen oder fortzuschreiben und umgekehrt. Diese Ansätze werden auch mit Blick auf die anschließend geführte Erläuterung der Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs aufgestellt. Insbesondere die anschließende Erläuterung zum methodischen Vorgehen und zur Verwendung in den Abschnitten 5.3.3 ⁷⁷ bzw. 5.3.4 ⁷⁸ zeigt das Erfordernis einer integrierten Werkzeugunterstützung.

Die folgende strukturierte Aufstellung in Tabelle 16

- A) benennt, welcher *Entwurfsbereich* schwerpunktmäßig von diesem Ansatz unterstützt wird,
- B) fasst die oben dargestellte *Abbildung auf Modellebene* zusammen,
- C) stellt für die *Unterstützung einer integrierten Modellierung eines Gebäudes* die erkannten *Integrationspunkte* und Bereiche der *Werkzeugunterstützung* dar

und listet der Vollständigkeit halber D) die Modellierungsbasis und E) die Implementierungsbasis des entworfenen Prototypen auf.

⁷⁷ Abschnitt *Vorgehen: Modellierung mit dieser Methode*

⁷⁸ Abschnitt *Verwendung: Vorgehen im nutzungsorientierten Gebäudeentwurf*

Integration	Gebäude mit Modellen zur Gebäudenutzung, insbesondere Gebäudetopologiemodell	Gebäude mit Modell der Industry Foundation Classes nach Stand des Building Information Modeling
A. Entwurfsbereich	Konzeptueller Entwurf mit dem Schwerpunkt der Gebäudenutzung	• Konzeptueller Entwurf • Gestalterischer Entwurf • Technischer Entwurf
B. Modellierungsgegenstände, die auf Ebene eines Gebäude-modells abzubilden sind:	Die Abbildung wird im Text dieses Abschnitts 5.2 ausführlich beschrieben. Hier werden die Modellelemente aufgelistet:	
• Gebäudetopologie	Topologie-Netz ist ein bipartites Referenznetz aus:	Objektorientiertes Gebäudemodell auf Basis IFC; relevant für Abbildung sind:
	• Raum-Stelle • Room Place Definitions Memory	IfcSpace
	• Raumübergangstransitionen • Room Transition Definitions Memory	IfcElement
• Raumbezeichnungen und Raumtypisierung	Room Transition Definitions Memory	IfcComplexProperty des IfcSpace
• Raumkapazität und -belegungszahl	Room Capacity Memory und Room Allocation Memory im Room Place Definitions Memory	IfcSimple Property des IfcSpace
• Raumübergänge und damit Verbindung von Räumen	Room Transition Definitions Memory	Keine Entsprechung, sondern durch den Übergangstypen abgebildet.
◦ Übergangstypen		IfcElement
◦ Barriereangaben		IfcSimpleProperty des IfcElement
• Angebotene Raumfunktion mit Nutzerrolle (im Falle der gemeinsamen Nutzung)	Room Use	IfcTask mit IfcActorRole
C. Unterstützung einer integrierten Modellierung eines Gebäudes		
C.1 Integrationspunkt	wirkt auf das Gebäudetopologiemodell:	wirkt auf das BIM-Modell:
• Räumliche Größen	Erzeugung von Kapazitäten der Raum-Stellen aus geometrischen Angaben	Vorgaben für geometrische Größen der Räume aus Kapazitäten
• Übergangsoptimierung, z. B. Barrierefreiheit	Bestimmung von Übergangstyp und Barriereangabe aus geometrischem Modell	Vorschläge für IfcElement aufgrund Übergangstyp und Barriereangabe
• Lage der Räume / Bewegungslogik	Konfiguration des Topologie-Netzes anhand des Raumprogramms	• Veränderung der Flurbreiten • Anordnung von Räumen
• Lage der Funktionen / Funktionsnutzungslogik	und der Funktionszuordnung	Zuordnung von Funktionen zu Räumen
C.2 Werkzeugunterstützung:		
• Modellebene	• Übernahme von vordefinierten Wertemengen von IfcElement für Übergangstyp und Barriereangabe • Erstellung von Mustern von Gebäudeteilen oder -elementen mit Abbildung zwischen den Modellen, z. B. für besondere Objekte der Gebäudetopologie	
• Benutzerschnittstelle / Editor	• Graphische Assoziation des Gebäudetopologie-Netzes und des geometrischen Gebäudemodells • Editieren des geometrischen Modells zeigt Änderungen im Gebäudetopologie-	

Integration	Gebäude mit Modellen zur Gebäudenutzung, insbesondere Gebäudetopologiemodell	Gebäude mit Modell der Industry Foundation Classes nach Stand des Building Information Modeling
	Netz und unterstützt bei der Bearbeitung (Erstellen, Löschen, Ändern) von Raum-Stellen und weist auf die Bearbeitung von Übergangstransitionen und Kanten hin. • Editieren des Gebäudetopologie-Netzes zeigt Hinweise auf Inkonsistenzen zum geometrischen Modell.	
• Analyse / Simulation	• Anschauliche Simulation der Gebäudenutzung im geometrischen Modell • Editiermöglichkeit für relevante Größen wie Kapazitäten, topologische Änderungen und Zuordnung von Funktionen zu Räumen während der Simulation • Ermittlung von Messgrößen für statistische Auswertung; dazu Positionierbarkeit von Messstellen im Gebäudetopologiemodell	
• Wiederverwendung / Fallbasiertes Schließen	• Erzeugung von Gebäudetopologie-Netzen aus bestehenden BIM-Modellen und Unterstützung notwendiger Ergänzungen durch den Entwerfer wie Übergangstransitionen und Kanten	
• Nutzungsfall-/Anforderungsspezifikation	• Anschauliche Aufzeichnung zur Spezifizierung eines Nutzungsfalls in einem geometrischen Modell und Generierung eines Nutzungsfallmodells	
D. Modellierungsbasis	Gebäudetopologie-Metamodell auf Basis von Petri Referenznetzen	Industry Foundation Classes (IFC)
E. Implementierungsbasis	Für diese Arbeit wurde eine Implementation mit dem Werkzeug Renew [Renew 2015], gewählt; Renew ist auf Basis der Java-Technologie realisiert. ⁷⁹	Verschiedene kommerzielle Produkte
• Implementierungsansatz	Nutzung des Java-basierenden Renew-Frameworks für die Manipulation (Erzeugung, Veränderung) der Referenznetze über Programmschnittstellen. Entwurf und Implementierung einer Integration beider Softwarelösungen zur Realisierung der o. g. Integrationspunkte.	Auswahl einer kommerziellen Lösung, die standardisierte und offene Schnittstellen zur programmierbaren Integration besitzt.

Tabelle 16: Unterstützung integrierter Modellierung von Gebäudetopologie mit diesem Modell und Gebäuden mit BIM

⁷⁹ Laut Lizenzbedingungen ist die Verwendung mit Renew erstellter Arbeiten erlaubt: „You are permitted to use works that you create with Renew (i.e., Java stubs, net drawings, EPS/PDF output, simulation states, and other exported data) without restrictions.“ [Renew Lizenz].

5.3 Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs

Für die Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs wird in dieser Arbeit eine Grundlage aus einem Modell und methodisch basierter Modellierung vorgestellt, welches die Nutzungsorientierung zum Gegenstand hat. Die folgenden Abschnitte zeigen die aufeinander aufbauenden Elemente der Modellierungsmethode:

- 5.3.1 Modell: Bezug zu den Modellierungsgegenständen und Erfüllung der Anforderungen
- 5.3.2 Methode: Einordnung in Basismethoden des Architekturentwurfs
- 5.3.3 Vorgehen: Modellierung mit dieser Methode
- 5.3.4 Verwendung: Vorgehen im nutzungsorientierten Gebäudeentwurf.

5.3.1 Modell: Bezug zu den Modellierungsgegenständen und Erfüllung der Anforderungen

Der Entwurf der hier vorgestellten Modellierungsbasis wurde mit dem Ziel der Erfüllung der in 4.3.1 definierten Anforderungen iterativ-inkrementell durchgeführt:

- Beginnend mit der noch unscharfen Vorstellung, einen Nutzungsfall als Anforderungsspezifikation formal zu beschreiben und zu überprüfen, ob die beschriebene Nutzung in einem Gebäude möglich ist,
- über die Idee, getrennte formale Beschreibungen eines Nutzungsfalls als Graph und der Topologie des Gebäudes zu finden, die miteinander verbunden werden sollen,
- hin zur Idee, diese Verbindung durch den Formalismus der synchronen Kanäle der Referenznetze zu modellieren.

Die Betrachtung möglicher Formalismen in 4.3.2 und die Auswahl in 4.3.3 erfolgte entlang der Anforderungen, deren Erfüllung durch die Modellelemente in folgender Aufstellung in Tabelle 17 strukturiert nachgewiesen wird. Der Nachweis wird durch Zuordnung der Ergebnisse der Metamodellbildung aus 5.1 zu den Anforderungen und anhand der Einordnung und dem Aufzeigen von Anknüpfungspunkten an BIM/IFC in 5.2 geführt. Wie bereits in 4.3.1 erwähnt, zielen alle Anforderungen darauf, dass neben der Modellbildung Aspekte der Bottom-Up- und Top-Down-Methoden aus 4.1 einbezogen werden. Die weiteren Basismethoden werden spezifisch durch die jeweiligen Anforderungen unterstützt.

Modellierungs-gegenstand	Anforderung ⁸⁰	Methodischer Bezug	Erfüllung durch das Modell (Verweis auf Seite im Text)
M O D E L L D E R G E B Ä U D E T O P O L O G I E			
Gebäude-topologie	• Die Gebäudetopologie soll als Lage-beziehung der Räume und Raum-übergänge beschrieben werden können. • Ein Raumübergang verbindet dabei zwei Räume.	Designfokus, Fallbasiertes Schließen	• Das <i>Gebäudetopologie-Netz</i> repräsentiert durch die Komponenten <i>Topologie-Netz</i>, <i>Rahmenwerk</i> und <i>Spezifikationsnetz</i> die Gebäudetopologie (S. 97). • Raum-Stellen und Raumübergangstransitionen als Teil des Topologie-Netzes werden in einem Gebäudetopologie-Netz repräsentiert (S. 98, 101).
Raumbezeich-nungen und Raum-typisierung	• Jeder Raum soll im Modell eindeutig bezeichnet werden können (Raumidentifikation). • Zu jedem Raum sollen eine Bezeichnung und ggf. Oberbegriffe oder Synonyme im Modell angegeben werden können.	Fallbasiertes Schließen	• In einem Gebäudetopologiemodell kann eine Raumidentifikation (S. 98) durch das <i>Room Place Definitions Memory</i> (S. 98) spezifiziert werden. • Bezeichnung, Ober-/Unterbegriffe oder Synonyme können durch das <i>Room Transition Definitions Memory</i> (S. 101) definiert werden.
Raumkapazität und -belegungszahl	Zu jedem Raum soll die Zuordnung • einer veränderlichen Kapazität und • einer veränderlichen Belegung modelliert werden können.	Designfokus, Simulation	Im Modell erlaubt das <i>Room Place Definitions Memory</i> (S. 98) die Zuordnung von Raumkapazitäten im <i>Room Capacity Memory</i> (S. 99) und von Raumbelegungen im <i>Room Allocation Memory</i> zu Raum-Stellen (S. 99).
Raumübergänge (Transitionen) und damit Verbindung von Räumen	Raumübergänge (Transitionen) sollen in folgenden Aspekten modellierbar sein: • Jeder Übergang soll genau zwei Räume verbinden. • Jeder Übergang soll eindeutig bezeichnet werden können (Transitionsidentifikation). • Die Nutzung eines Raumübergangs hängt von einer Berechtigung ab. • Eine graphische Repräsentation soll möglich sein: Räume und Raumübergänge sollen verbunden werden durch gerichtete Kanten. Eine solche Relation modelliert die Richtung des Übergangs in erster Linie als Vorgabe für eine Bewegungsrichtung von einem Raum zu einem anderen via des Übergangs.	Designfokus, Fallbasiertes Schließen, Simulation	• Das Metamodell definiert das Topologie-Netz (S. 97) wie angefordert. • Jeder Raumübergangstransition wird in einem Gebäudetopologie-Netz eine Transitionsidentifikation (S. 101) zugeordnet. • Das Gebäudetopologie-Netz stellt die Berechtigungsprüfung im Regelwerk <i>Room Transition Definitions</i> (S. 109) bereit. Für ein Modell wird im <i>Room Access Definitions Memory (Transition Allowness Definitions)</i> (S. 110) die Berechtigung für Rollen und Nutzungsfälle verwaltet. • Das Topologie-Netz (S. 97) eines Modells hat eine graphische Repräsentation.
• Übergangs-typen	Zu jedem Übergang soll eine Typisierung modelliert werden können.	Designfokus, Simulation	Für ein Modell wird pro Raumübergangstransition der Typ bzw. die Barriereangabe im <i>Room Transition Definitions Memory</i> (S. 101) verwaltet und im Regelwerk <i>Room Transition Definitions</i> (S. 109) verarbeitet.
• Barriere-angaben	Die Zuordnung einer Barrierebezeichnung soll modellierbar sein.	Designfokus, Simulation	

80 Die Anforderungen wurden in 4.3.1 formuliert.

Modellierungs- gegenstand	Anforderung	Methodischer Bezug	Erfüllung durch das Modell (Verweis auf Seite im Text)
M O D E L L D E R N U T Z U N G			
Bewegung zwischen Räumen	Die Nutzung von Räumen ist verbunden mit der Möglichkeit der Bewegung zwischen diesen. Eine Bewegung zwischen jeweils genau zwei Räumen soll modelliert werden können.	Designfokus, Fallbasiertes Schließen, Simulation	Das Metamodell für die Nutzung definiert die Bewegung im Nutzungsfallnetz und die graphische Repräsentation im <i>Nutzungstopologie-Netz</i> (S. 116).
Gebäude- bzw. Raumfunktions- nutzung mit verschiedenen Nutzungsarten	• Die Nutzung des Gebäudes bzw. der Räume soll modellierbar sein als Nutzung einer vom Raum angebotenen Funktion. • Jede Funktion soll eine Bezeichnung haben. Es ist möglich, dass verschiedene Räume gleich bezeichnete Funktionen haben. • Einem Raum dürfen mehrere Funktionen zugeordnet sein. • Es soll die Nutzung durch einen oder mehrere Teilnehmer modelliert werden können. • Im Falle mehrerer Teilnehmer sollen zwei Arten modelliert werden können: Gemeinsame Nutzung und gemeinsame Nutzungsszenarien.	Designfokus, Fallbasiertes Schließen, Simulation	• Das Metamodell gibt vor, dass eine Funktion eines Raums im Gebäudetopologie-Netz durch eine Raumfunktionstransition (S. 100) repräsentiert wird. • Regelwerke eines Gebäudetopologie-Netzes beschreiben die Logik der Funktionsnutzung: • <i>Room Use Definitions Memory</i> (S. 111) für die einfache Funktionsnutzung. Die Anforderung zur Bezeichnung und Anzahl an Funktionen wird erfüllt. • <i>Room Joined Use</i> (S. 113) für die gemeinsame Nutzung durch eine festgelegte Anzahl an Teilnehmern • <i>Room Joined Team Use (Scenario)</i> (S. 113) für die gemeinsame Nutzung durch Teilnehmer mit definierten Rollen.
Zugangs- berechtigungen	• Für die Nutzung eines Raums bzw. seiner angebotenen Funktionen soll die Berechtigung hierzu modelliert werden können. • Die Prüfung einer Berechtigung der Nutzung eines Raums soll auf die Prüfung der Berechtigung der Bewegung entlang eines Raumübergangs zurückgeführt werden. • Dies soll durch die Modellierung der Berechtigung zu einem zugehörigen Raumübergang erfolgen.	Designfokus, Simulation	Das Gebäudetopologie-Netz hat zur Prüfung das Regelwerk <i>Room Transition Definitions</i> (S. 109). Für ein Modell werden Berechtigungen im <i>Room Access Definitions Memory (Transition Allowness Definitions)</i> (S. 110) verwaltet.
N U T Z E R			
Nutzerrollen	• Der Nutzer tritt im Modell nur partiell auf. Er ist reduziert auf die notwendigen Aspekte wie unter 4.2.3 erklärt. • Im Zusammenhang mit der Modellierung der Zugangsberechtigung zu Räumen sollen Nutzerrollen durch Bezeichnungen modelliert werden können.	Designfokus	Das Metamodell des Nutzungsfalls gibt vor, dass durch ein Nutzungsfallnetz im <i>User Role Definition Memory</i> (S. 116) Rollenbezeichnungen definiert werden.

Modellierungs-gegenstand	Anforderung	Methodischer Bezug	Erfüllung durch das Modell (Verweis auf Seite im Text)
M O D E L L D E S N U T Z U N G S F A L L S			
Nutzungsfall, Eigner ist Nutzer	Ein Nutzungsfall soll folgende Aspekte modellieren: • Bewegung im Gebäude zwischen Räumen • Folge von Räumen und Raumübergängen • Spezifikation der Nutzung von Funktionen eines Raums • Ein Nutzungsfall ist bewegungsorientiert oder funktionsorientiert oder diesbezüglich neutral. • Graphische Repräsentation: Räume und Raumübergänge sollen verbunden werden durch gerichtete Kanten. Eine solche Relation modelliert die Richtung der Bewegung von einem Raum zu einem anderen via des Übergangs.	Designfokus, Fallbasiertes Schließen, Simulation	• Das Metamodell sieht vor, dass die Spezifikation einer Bewegungsanforderung in einem <i>Nutzungstopologie-Netz</i> (S. 116) durch eine Raumübergangsanforderungstransition erfolgt (S. 117). • Eine Nutzungsanforderung kann außerdem durch die Spezifikation einer Funktionsanforderung mittels einer <i>Raumfunktionsanforderungstransition</i> (S. 119) beschrieben werden. Dabei wird unterschieden zwischen Anforderung einfacher Funktionsnutzung (S. 119) und Anforderung der gemeinsamen Nutzung mit festgelegter Anzahl der Teilnehmer (S. 119) und mit vorgegebenen Rollen (S. 120). • Es kann eine Nutzungsausprägung (bewegungs- oder funktionsorientiert) in der Gebäudenutzung spezifiziert werden, wenn Nutzungsfälle initiiert werden (S. 118 und S. 132).
Nutzungsfall-identifikation	Jeder Nutzungsfall soll eindeutig bezeichnet werden können.		• Das Metamodell sieht vor, dass im Rahmenwerk des Gebäudetopologie-Netzes im <i>Usecase ID Memory</i> (S. 117) für jedes Nutzungsfallnetz eine Identifikation verwaltet wird. • Zusätzlich kann eine Typen-Identifikation (S. 116) im Zusammenhang mit der Aktivierung des Nutzungsfalls vergeben werden: <i>activate</i>-Transition (S. 121). Diese spezifiziert die zu aktivierende Ausprägung für die Simulation.
Ablauf der Nutzung von Funktionen	Die sich über das Gebäude erstreckende Nutzung von Funktionen, die in mehreren Räumen angeboten werden, kann einer vorgegebenen Reihenfolge unterliegen. Diese Reihenfolge soll im Nutzungsfall modelliert werden können. Folgende Anforderungen bestehen im Detail: • Die Festlegung einer Abfolge von Funktionsnutzungen soll durch Statuszustände der Erledigung modelliert werden können. • Eine mögliche Abhängigkeit der Bewegung zwischen Räumen von der Erledigung von Raum- oder Funktionsnutzungen soll modelliert werden können. • Diese Festlegungen sollen graphisch modelliert werden können.	Designfokus, Simulation	• Für die Modellierung der Nutzungsabfolge sieht das Metamodell die Verwendung von <i>Task-Stellen</i> (S. 121) im Nutzungstopologie-Netz (S. 116) vor. • Die Belegung der Task-Stellen erfolgt durch Schalten der Raumübergangs- oder Raumfunktionsanforderungstransition. • Abhängig von der Belegung der Task-Stellen kann die Bewegung definiert werden.

Modellierungs- gegenstand	Anforderung	Methodischer Bezug	Erfüllung durch das Modell (Verweis auf Seite im Text)
M O D E L L D E R G E B Ä U D E N U T Z U N G			
Verbindung von der Bewegung zwischen Räumen und dem Raumübergang sowie von Raumfunktionsnutzungsanforderung und Raumfunktionsangebot	Eine essentielle Anforderung betrifft die Zusammenführung von Gebäudetopologie und Nutzungsfall. • Gebäudetopologie und Nutzungsfall sollen in zwei getrennten Modellen spezifiziert werden können. Zur Prüfung, ob eine Gebäudetopologie der Anforderung eines Nutzungsfalls (oder mehrerer Nutzungsfälle) gerecht wird, ist eine Zusammenführung der beiden (oder mehrerer) Modelle und Simulation notwendig. • Die Bewegung zwischen Räumen und der Raumübergang, entlang dessen die Bewegung erfolgen kann, sollen im Modell in Beziehung gesetzt werden können. • Die Verbindung zwischen einer Anforderung nach einer zu nutzenden Funktion und einem Raumfunktionsangebot soll modellierbar sein.	Simulation	• Das Metamodell sieht die getrennte Modellierung von Gebäudetopologie durch ein Gebäudetopologie-Netz (S. 97) und der Nutzungsfälle durch ein <i>Nutzungsfallnetz</i> (S. 116) vor. • Die Zusammenführung wird durch ein Modell der Gebäudenutzung repräsentiert und umfasst das Einbringen der Nutzungsfälle in die Gebäudetopologie (S. 132) durch Modellelemente der Transitionen <i>Start using Building</i> und <i>Inject Usecase</i> (S. 133), durch den jedes Nutzungsfallnetz über die Kante <i>Injection Needle</i> in das Gebäudetopologie-Netz als Objektmarke eingebracht wird. • Die Verbindung zwischen Bewegung zwischen Räumen, die durch das Nutzungsfallnetz angefordert ist, und einem Raumübergang des Gebäudetopologie-Netzes wird durch <i>Unifikation der Transitionsinformation</i> erreicht, die Bewegungs-/Übergangsanforderung des Nutzungsfalls und Gebäude-Raumübergang verbindet: <i>usecase:move(t); building:transition(id,t,usecase)</i> (S. 124) und Room Move Definition (S. 118) und Room Transition Definitions (S. 109) • Die Verbindung zwischen angeforderter Funktion im Nutzungsfall und Funktionsangebot der Gebäudetopologie ist im Topologie-Netz verortet, wobei die Beschriftung die Verbindung zum Nutzungsfall herstellt: <i>usecase:useFunction()</i> (S. 125). • Durch die Regelwerke <i>Room Function Use Definition</i> des Nutzungsfallnetzes (S. 120) und die Regelwerke des Gebäudetopologie-Netzes <i>Room Use Definition</i> (S. 112), <i>Room Joined Use Definition</i> (S. 112) und <i>Room Joined Team Use Definition</i> (S. 112) wird die Nutzungslogik beschrieben.

Modellierungs- gegenstand	Anforderung	Methodischer Bezug	Erfüllung durch das Modell (Verweis auf Seite im Text)
E I N O R D N U N G U N D A N K N Ü P F U N G S P U N K T E A N B I M			
Gebäude bzw. alle	Neben Anforderungen bezüglich der Modellierung der Gegenstände besteht eine Anforderung an das Modellierungsergebnis, an das Modell. Diese Anforderung unterstützt die Verbindung dieser Modellierungsmethode mit BIM und bildet die Basis für einen Realisierungsansatz. • Für ein aus dieser Methode gebildetes Modell soll die Möglichkeit der Zuordnung von Modellelementen zu Artefakten des Architekturentwurfs, insbesondere einem 3D-Gebäudemodell, gegeben sein. • Auf dieser Basis soll die Abbildung des Gebäudetopologiemodells in ein BIM-Modell und umgekehrt unterstützt werden. • So soll z. B. die Einbindung von räumlichen Aspekten in die Modellierung der Gebäudetopologie unterstützt werden und umgekehrt sollen aus einem Modell der hier vorgestellten Methode Parameter auf ein BIM-Gebäudemodell abbildbar sein.	Modellbildung	Vergleiche 5.2, Tabelle 16

Tabelle 17: Erfüllung der Anforderungen an die Modellierungsmethode

5.3.2 Methode: Einordnung in Basismethoden des Architekturentwurfs

Die Modellierungsmethode zur Unterstützung des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs hat eine fundierte Basis auf Methoden des Architekturentwurfs, auch wenn die Grundlage der Modellierungssprache auf der der Informatik zuzurechnenden Petrinetz-Theorie basiert. Die folgenden Ausführungen zeigen die Einordnung der Methode in grundlegende Methoden des Architekturentwurfs, die in 4.1 begründet ausgewählt wurden.

Die Einordnung der Methode in Basismethoden des Architekturentwurfs ist hilfreich für die Charakterisierung des Zusammenhangs zwischen dem vorgestellten Metamodell und der Methodik, die zur Modellbildung von Gebäudetopologien, Nutzungsfällen und der Gebäudenutzung dient. Die Methode basiert auf den Basismethoden, d. h. eine Modellierung nutzt die Basismethoden. Dies wird deutlich durch Abbildung 45, die darstellt, *welche Basismethode im Zusammenhang mit welchem Metamodellelement genutzt wird*. Die Nummerierung stammt aus Tabelle 18.

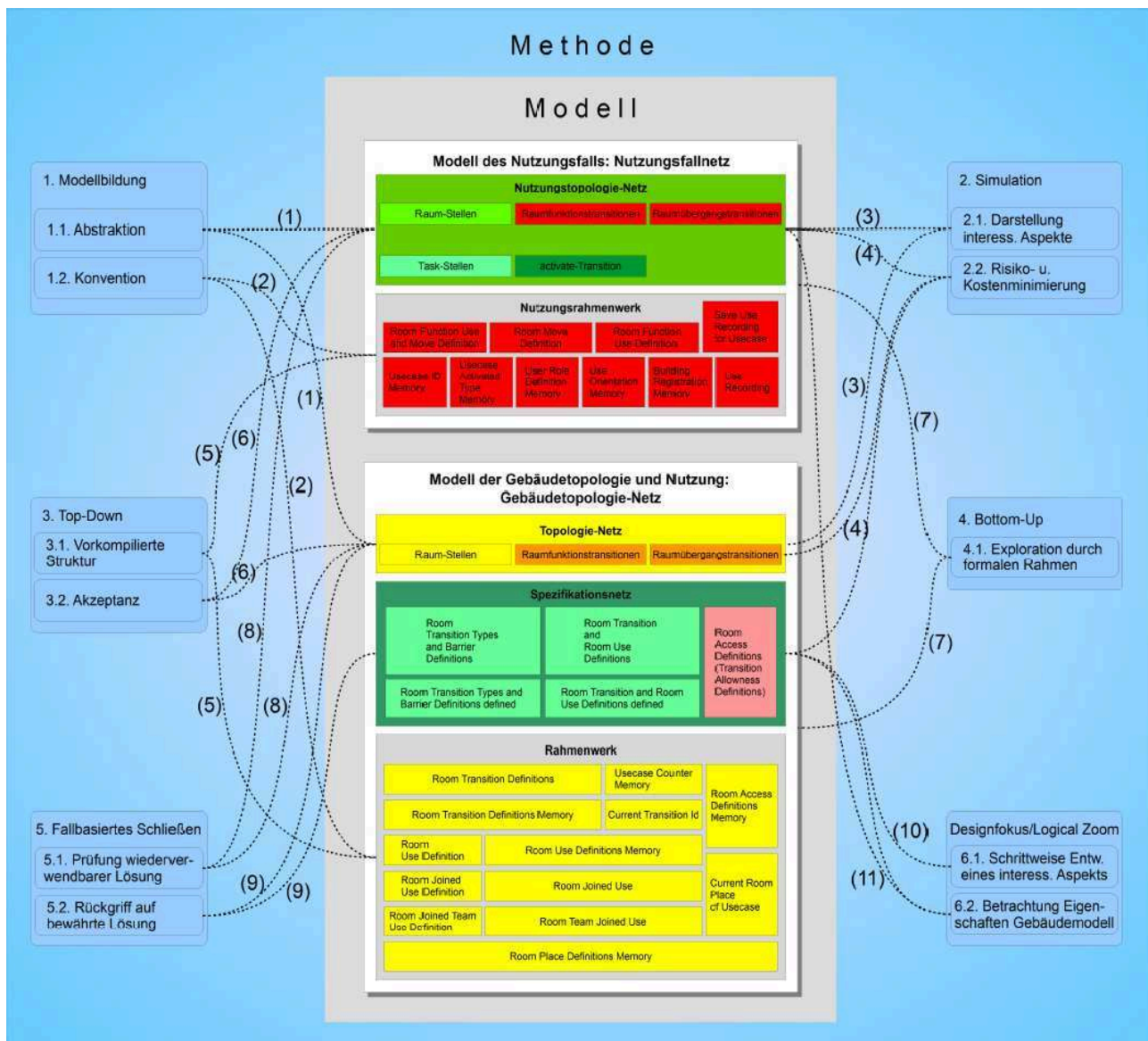


Abbildung 45: Methode auf Basis des Modells

Methode / · Aspekte	Unterstützung des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs
Modellbildung	
• Abstraktion und vereinfachte Darstellung für Entwerfer	(1) Die gewählte Repräsentation für den Entwurf reduziert das Gebäude auf eine vereinfachte Darstellung der Modellierungsgegenstände⁸¹ der Gebäudenutzung. Interessierende Aspekte der Entwurfsaufgaben sind: • Gebäudetopologie • Raumübergang und Raumübergangsanforderung • Funktionsangebot und -nutzung. Die gewählte graphische Darstellung ist abbildbar auf ein BIM und nahe an der Modellierungserfahrung eines Entwerfers, der die Abstraktion und Modellbildung u. a. von BIM kennt.
• Konvention	(2) Die Methode umfasst durch das Metamodell strukturelle Vorgaben zur Modellierung von: • Gebäudetopologie • Nutzungsszenarien, -fällen und -abläufen.
Simulation	
• Darstellung der interessierenden Aspekte	(3) Die Simulation ist ein Bestandteil zur Darstellung der für die Gebäudenutzungsmodellierung interessierenden Aspekte: • <i>Gebäudenutzung</i>: Die Methode umfasst die Simulation, welche manuell gesteuerte Simulationsschritte zum Verständnis folgender Eigenschaften des modellierten Gebäudes erlaubt: ◦ Visualisierung der Bewegung in der Topologie und Nutzung von Funktionen ◦ Bewegung: Die Verwendung des Modells zur Gebäudenutzung kann im Fall von Übergangstypen bzw. Barriereangaben die Überprüfung der Raumübergänge hinsichtlich der geplanten Elemente mit ihren Typen (Tür, Treppe, etc.) bzw. ihren Barrieregraden und die Optimierung anhand geforderter Bedürfnisse der Nutzung unterstützen. ◦ Raumfunktionsnutzung: Überprüfung und Optimierung der Anordnung angebotener Funktionen im Gebäude anhand geforderter Bedürfnisse der Nutzung und Nutzungsarten (einfache oder gemeinsame Nutzung) ◦ Nutzungsausprägung: Überprüfung und Optimierung der Anordnung angebotener Funktionen im Gebäude und der Räume und Raumübergänge anhand der Nutzungsausprägungen, d. h. bewegungs- oder funktionsorientierter Nutzungsfälle ◦ Ablauf der Nutzung von Funktionen: In der Analyse von kooperativer Gebäudenutzung ist die Funktionsnutzungsabfolge jedes Nutzungsfalls interessant für die Bewertung der Unterstützung von angeforderten Funktionsangeboten durch die Gebäudetopologie und insbesondere die Anordnung von Funktionsangeboten im Gebäude. ◦ Zugangsberechtigungen: Überprüfung des Zusammenspiels von Zugangsberechtigungen und Barrieren, z. B. öffentlicher Zugang über Treppe, barrierefreier Zugang nicht (immer) öffentlich. • <i>Nutzungsfall</i>: Die Methode umfasst die Simulation, welche manuell gesteuerte Simulationsschritte zur anschaulichen Überprüfung des Nutzungsablaufs gemäß Nutzungsfällen umfasst. Die Visualisierung der Abläufe und Zustände der einzelnen Nutzungsfallinstanzen erlaubt das Erkennen von unerwünschten Abläufen bzw. Reihenfolgen oder Situationen wie Blockaden, endlosen Wartezuständen oder Kooperationsmängeln bei der gemeinsamen Nutzung von Raumfunktionen. Ursachen für diese Situationen, die in Inkompatibilität zwischen Nutzungsfall und Gebäudetopologie liegen, sind dadurch leichter lokalisierbar. Die Aufzeichnung des Nutzungsablaufes jedes Nutzungsfalls erlaubt die nachträgliche Auswertung von Bewegungen zwischen Räumen und Funktionsnutzung. • <i>Nutzerrollen</i>: Aus der Simulation der Gebäudenutzung wird deutlich, welche Rollen zu welchen Zugangs- und Nutzungsberechtigungen führen. Insbesondere werden Zusammenhänge zwischen Gebäudetopologie und Nutzungsfällen und kooperativer Nutzung aufgrund der zugeordneten Rollen sichtbar.

81 In 4.2 erfolgt die Definition der Modellierungsgegenstände.

Methode / · Aspekte	Unterstützung des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs
• Risiko- und Kosten-minimierung	(4) Die Simulation unterstützt die Überprüfung der Gebäudestruktur aus Raumübergangs- und Raumfunktionsbeziehungen durch Analyse der modellierten Gebäudetopologie und der Nutzungsabläufe, spezifiziert durch Nutzungsfälle. Hierzu werden die Nutzungsabläufe im Zusammenhang mit der Gebäudetopologie graphisch visualisiert. Die Analyse erlaubt: • die Prüfung von Nutzungsfällen und -szenarien • die Prüfung der Gebäudetopologie hinsichtlich bewegungs- und funktionsorientierter Nutzungsfälle (Nutzungsausprägung) • die Prüfung der Eignung der Gebäudetopologie hinsichtlich der Unterstützung der angeforderten Nutzungsfälle. Im Wechsel zwischen Entwurf und Analyse kann eine interaktive und iterative Annäherung der Topologie erreicht werden, die die Nutzungsanforderungen erfüllt.
Top-Down	
• Vereinfachung durch vorkompilierte Struktur	(5) Ein Rahmenwerk und Konventionen zur Modellierung von Gebäudetopologie und Nutzungsfällen geben einen Rahmen vor, innerhalb dessen Modelle entworfen werden.
• Akzeptanz der Modellierungsmethode	(6) Die Akzeptanz der Methode wird unterstützt durch: • eine graphische Modellierungssprache für den anschaulichen Entwurf der Gebäudetopologie als Systemnetz und Spezifikation der Nutzungsfälle als Elementnetz • eine Ablaufbeschreibung für Funktionsnutzung in Nutzungsfällen, die sich an graphischen Workflow-Beschreibungen orientiert. • Erzeugung von Protokollen pro Nutzungsfall, die lesbar sind und in Auswertungssoftware (wie Tabellenkalkulationen) geladen werden können.
Bottom-Up	
• Exploration, unterstützt durch formalen Rahmen	(7) • Die vorgestellte Methode bietet einen explorativen Ansatz durch die Möglichkeit, mit kleinen Gebäudeteilen zu beginnen und dort sehr detailliert zu modellieren. • Eine weitere schrittweise Zusammensetzung zu einer gesamten Gebäudetopologie geschieht über anschließende iterativ-inkrementelle Entwurfsschritte. • Die vorgestellte Methode bietet durch ihre formalen Spezifikationen von Gebäudetopologie und Nutzungsfällen einen formalen Rahmen, der rationale Entscheidungen auf Basis von Experimenten formaler Art — d. h. Simulationen — unterstützt. Schmitt nennt diesen Aspekt als Voraussetzung [Schmitt 1993], S. 44.
Fallbasiertes Schließen	
• Überprüfung wiederverwendbarer Lösung	(8) • Bei der Verwendung von Referenzen kann die vorgestellte Methode die Evaluation in der Fragestellung unterstützen, ob Auswahl und Anpassungen des wiederverwendeten Falls das gewünschte Resultat erbringen. Dies geschieht, indem die Simulation als Resultat zeigt, ob die Nutzungsfälle die Topologie des wiederverwendeten, angepassten Lösungsvorschlags durchlaufen können.

Methode / · Aspekte	Unterstützung des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs
• Rückgriff auf bewährte Lösungen	(9) • Die Repräsentation von Referenzen als Diagramme — nämlich ein Gebäudetopologie-Netz als Petrinetz-Graph bzw. -Diagramm — ist Grundlage der Zugänglichkeit und im nächsten Schritt, durch Anregung und als Richtschnur für den Entwurf und die Generierung passender Topologien als abstrakte architektonische Formen, zur Modellierung der Gebäudenutzung. Diese Abstraktion ist aber keine Vereinfachung, sondern eine Reduktion des Modells auf die relevanten Modellierungsgegenstände. Dies unterstützt im Wesentlichen die folgende Feststellung: „The mechanisms and interrelations that lead to the perception of a specific building as “type,” “prototype,” or “container” come close to the properties and applications of diagrams. In this spirit, one could say that any architectural reference has to become diagrammatic, in its perception and thus in its representation ..., to become “prototypical” in the next stage and therefore paradigmatic and generative, permitting the production of architectural forms in the next step again. In relation to its representation, it is important to clarify that the abstraction of an architectural reference does not necessarily imply its simplification. It can also be applied to selectivity procedures, which are typical as much for diagrammatic depictions as for architectural actions.“ [Stapenhorst 2016], S. 199. • Modelle von Gebäudetopologien sind Petrinetz-Graphen. Der Rückgriff auf bewährte Topologien ist zu unterstützen durch eine Suche nach Topologie-Graphen. Ausgangspunkt sind Nutzungsfälle des neuen Entwurfsproblems. Die Suche muss das Auffinden von Topologie-Graphen zur Anfrage, bestehend aus Nutzungsfall-Graphen, lösen. Hier ist das Problem der Termination⁸² zu beachten. Das Ziel, Fallbasiertes Schließen zu unterstützen, gibt Anlass für eine weitere Forschung auf Basis der hier vorgestellten Methode. • Aus der Anwendung der Methode für verschiedene Gebäudemodelle kann eine Ableitung bzw. Verfeinerung einer Ontologie für Raumbezeichnungen erreicht werden, die zu einer standardisierten und damit universell verwendbaren Beschreibung von Nutzungsfällen beitragen.
Designfokus / Logical Zoom	
• Schrittweise Entwicklung eines Entwurfsansatzes hinsichtlich eines interessierenden Gesichtspunktes	(10) Die Betrachtung des Gesichtspunktes der Gebäudetopologie kann durch den vorgestellten Ansatz unterstützt werden, insbesondere die Möglichkeit, Gebäudeteile durch Stellen zu modellieren und durch Aufgliederung dieser in Netze Gebäudeteile in Räume zu verfeinern.
• Betrachtung der Eigenschaften des Gebäudemodells	(11) Die Simulation erlaubt die Betrachtung • der Gebäudetopologie und ihrer Bestandteile, insbesondere ◦ Räume: Kapazitäten, Belegung im Nutzungsverlauf ◦ Raumübergänge: Auswirkungen von Barriereigenschaften, Übergangstypen und -berechtigung auf die Bewegung im Gebäude ◦ Funktionsangebote: Nutzbarkeit der Funktionen • sowie der einzelnen Nutzungsfälle hinsichtlich der Erreichbarkeit der angeforderten Funktionen über die gewünschten Bewegungswege im Gebäude.

Tabelle 18: Einordnung der Methode in Basismethoden des Architekturentwurfs

82 Dies wird in 4.4.2 angesprochen.

5.3.3 Vorgehen: Modellierung mit dieser Methode

Das Vorgehen zur Modellierung mit der in 5.3.2 eingeordneten Methode, basiert auf dem entwickelten Modell, das in 5.3.1 zusammengefasst wird. Um die Methode verwenden zu können, bedarf es einer Erläuterung des möglichen Vorgehens zur Modellierung. Das Vorgehen nutzt hierbei die vorgestellte Methode, insbesondere die Basismethoden dieser Methode. Das Vorgehen ist orientiert an den wesentlichen Phasen im Lebenszyklus eines Gebäudes. Hierbei wird deutlich, dass diese Methode das Vorgehen in einigen Phasen unterstützt und für viele Aktivitäten keine Modellierungsmethode darstellt. Dies wird in diesem Abschnitt anhand der Abbildung 46 erläutert. Diese zeigt im unteren Bereich den Lebenszyklus eines Gebäudes aus [BIM 2015], S. 4, anhand dessen das Vorgehen eingeordnet wird. Der vorgestellte Ansatz kann diesbezüglich die Phasen des Entwurfs, der Planung und des Umbaus des Lebenszyklus eines Gebäudes unterstützen.⁸³

In der *Phase des Entwurfs* wird durch das Vorgehen zur Modellierung mit dieser Methode das konzeptionelle Design unterstützt. Zu unterscheiden ist hierbei der Neuentwurf von einem durch die Phase des Umbaus initiierten Entwurf.

Im ersten Fall ist dies ein *Individualentwurf* (A), der die Berücksichtigung von Nutzungsfällen erfordert. Hier besteht das Vorgehen aus der Anwendung der Methoden Modellbildung, Top-Down, Fallbasiertes Schließen und Designfokus/Logical Zoom. Die Modellbildung bezieht sich auf die Bildung von Modellen für die Nutzungsfälle und die Gebäudetopologie. Nutzungsfälle werden aus in der Regel verbal oder textuell formulierten Anforderungsbeschreibungen in formale Modelle auf der Basis des hier eingeführten Metamodells⁸⁴ übertragen. Für den Entwurf der Gebäudetopologie bzw. eines Modells wird durch Fallbasiertes Schließen auf bewährte Lösungen zurückgegriffen.⁸⁵ Ein weiterer Ansatz ist die Erstellung eines Raumprogramms als Ausgangspunkt für die Ableitung der Gebäudetopologie. Durch die Methode Top-Down wird die Gebäudetopologie verfeinert. Dies erfolgt unter Betrachtung interessierender Aspekte, die durch den Abgleich von Nutzungsfällen mit der bis dahin entwickelten Gebäudetopologie in den Designfokus treten. Hiermit ist eine Übernahme einer Bewegungsspezifikation in Form eines Teilnetzes in das Gebäudetopologie-Netz gemeint. Die eigentlich für die Phase der Planung vorgesehene Simulation ist vorzuziehen in die Entwurfsphase oder dort zusätzlich vorzusehen für die Eignungsprüfung der Gebäudetopologie für die Nutzungsfälle (C). Durch iteratives und inkrementelles Vorgehen auf Basis der genannten Basismethoden wird der Entwurf einer Gebäudetopologie unterstützt, die die Nutzungsfälle erfüllt. Beispielsweise unterstützt die Verwendung des Modells der Gebäudenutzung zusammen mit der Methode der Simulation die Überprüfung von Raumbelegungen und Anpassung von Raumkapazitäten bereits in der Entwurfsphase sowie die Anordnung von Raumübergängen, die Wahl von Raumübergangstypen und das Thema Barrierefreiheit. Auch die Nutzungsfälle können unter Betrachtung der Gebäudetopologie verfeinert, angepasst oder optimiert werden, so dass sie zur Gebäudetopologie mit u. U. unveränderlichen Rahmenbedingungen passen, also eine vollständige Gebäudenutzung beschreiben.

Im Fall des *Entwurfs im Rahmen eines Umbaus* zur Revitalisierung oder Umnutzung ist vom bestehenden Gebäude und zugehöriger vorliegender Dokumentation auszugehen. Das o. g. Raumprogramm ist durch den bestehenden Grundriss leicht herleitbar bzw. bereits dokumentiert. Das

⁸³ Gemäß der Definition der 5Dinitiative (5Di) ist der vorgestellte Ansatz dem konzeptuellen Gebäudeentwurf der Lebenszyklusphase *Projekt Entwicklung* zuzuordnen [BIM 2015], S. 558.

⁸⁴ Vergleiche 5.1.4 und 5.3.1.

⁸⁵ Dies kann zukünftig durch einen Rückgriff auf eine Gebäudetopologie-Datenbank unterstützt werden. Im Projekt METIS zum Beispiel wird an der Bereitstellung von Modellen und Abfragesprachen auf Basis BIM für die Zugänglichkeit bestehender Gebäudemodelle gearbeitet, wie in 3.4 beschrieben [METIS-DFKI 2017], [METIS-TUM 2017]. Hier ist aber eine Speicherung von Gebäudetopologiemodellen gemeint, die auf Referenznetzen basieren.

Vorgehen im Entwurf im Zusammenhang mit der Modellierung nach dieser Methode besteht zunächst in der Abbildung der Gegebenheiten in ein Modell der Gebäudetopologie, in der Abbildung 46 als Reengineering (B) bezeichnet. Dies wird durch die Methode Bottom-Up unterstützt. Die Spezifikation der Umnutzung erfolgt durch eine formale Beschreibung der gewünschten Nutzungsfälle. Dies ist eine wichtige Vorbereitung für die Prüfung des zur Umnutzung entwickelten Gebäudetopologiemodells (E). Am durch Reengineering erreichten Ausgangspunkt beginnt die Modellierung der Gebäudetopologie mit dem Ziel, ein Gebäudetopologiemodell zu entwerfen, das die Nutzungsfälle erfüllt. Die Eignungsprüfung der Topologie für die Nutzungsfälle erfolgt durch die Methode der Simulation, wie sie auch für einen Neu- bzw. Individualentwurf eingesetzt wird. Auch hier können durch das Modell der Gebäudenutzung die zum Individualentwurf genannten Eigenschaften in die Eignungsprüfung einbezogen werden.

Die *Phase der Planung* wird durch die Simulation unterstützt. Im Zusammenhang mit dem der Phase des Entwurfs zuzurechnenden konzeptionellen Design besteht das Vorgehen dieser Methode in der Eignungsprüfung des Gebäudetopologiemodells für die Nutzungsfälle (C). Die Darstellung interessierender Aspekte unterstützt dieses Vorgehen. Die Minimierung von Risiko und damit auch Kosten durch Fehlerkorrekturen in späteren Phasen ist ein wesentlicher Aspekt der Eignungsprüfung, spätestens in der Planungsphase. Möglich ist die Eignungsprüfung bereits in der iterativ-inkrementellen Ausarbeitung der Gebäudetopologie in Abstimmung mit den Nutzungsfällen wie oben beschrieben. Die Eignungsprüfung verbunden mit der Simulation ist relevant für alle Fälle: den Neu- bzw. Individualentwurf, den Umbau und die Umnutzung. Die Entwicklung der Gebäudetopologie hin zur Erfüllbarkeit der Nutzungsfälle hat die Rahmenbedingungen der Gegebenheiten zu beachten. Dies geschieht durch Prüfung der Machbarkeit (D) dieser Entwicklung als wichtiger Schritt des Vorgehens. Die Prüfung geschieht auf Basis der Modelle der Gebäudetopologie, Nutzungsfälle und der Simulation der Gebäudenutzung, die im Detailbezug „Bottom-up“ so aneinander angepasst werden, dass die Anforderungen der Nutzungsfälle akzeptabel bleiben und die Gebäudetopologie machbar bezüglich der baulichen Rahmenbedingungen ist. Hier wird formal deutlich, welche Grenzen die Veränderung der Gebäudetopologie hat und welche Veränderungen der Nutzungsfälle erforderlich sind.

Die entwickelten Modelle der Gebäudetopologie und der Nutzungsfälle sind Ergebnis des Vorgehens und Basis für den weiteren gestalterischen und technischen Entwurf. Alle Entwurfstypen dürfen nicht isoliert betrachtet werden. Hier ist allerdings zunächst der Schwerpunkt auf den konzeptuellen Entwurf gelegt worden. Ein iterativ-inkrementelles Vorgehen über den konzeptuellen, gestalterischen und technischen Entwurf ist theoretisch gegeben und praktisch umsetzbar, wenn die Modelle der Gebäudetopologie und eines BIM zusammengeführt sind. Ansätze für eine derartige Realisierung sind in 5.2 beschrieben. Im Falle der Integration ist eine Wechselwirkung zwischen gestalterischen Veränderungen und Gebäudetopologie oder Auswirkungen technischer Anforderungen auf Gestalt und Topologie, etc. direkt im Modell nachvollziehbar. Der hier vorgestellte Ansatz ergänzt die Entwurfssichten Gestalt und Technik um die Gebäudenutzung und ihre formale Prüfung. Ein Gebäudemodell im Sinne BIM soll alle, für die genannten Phasen relevanten Informationen in einem Modell zusammenfassen und ein Informationsmodell sein, welches die Realisierung in diesen Phasen durch die Erzeugung, Veränderung und Nutzung des Modells und seiner Informationen unterstützt. Diese Informationen sind wesentlich für die Aufgaben des Architekten: „In the end, architects are information-workers. Architects do not manipulate stones, steel or space. Instead, architects manipulate information about stones, steel and space.“ [Russell Elger 2008]. Die vorgestellten Modelle im Zusammenhang mit dem methodischen Vorgehen, und zukünftig integriert in einem BIM-Werkzeug, sind ein weiterer relevanter Bestandteil und ein Instrument für den Architekten in seiner Rolle als „Information-worker“, die Gebäudemodellierung um den Aspekt der Gebäudenutzung bzw. Nutzungsorientierung zu ergänzen.

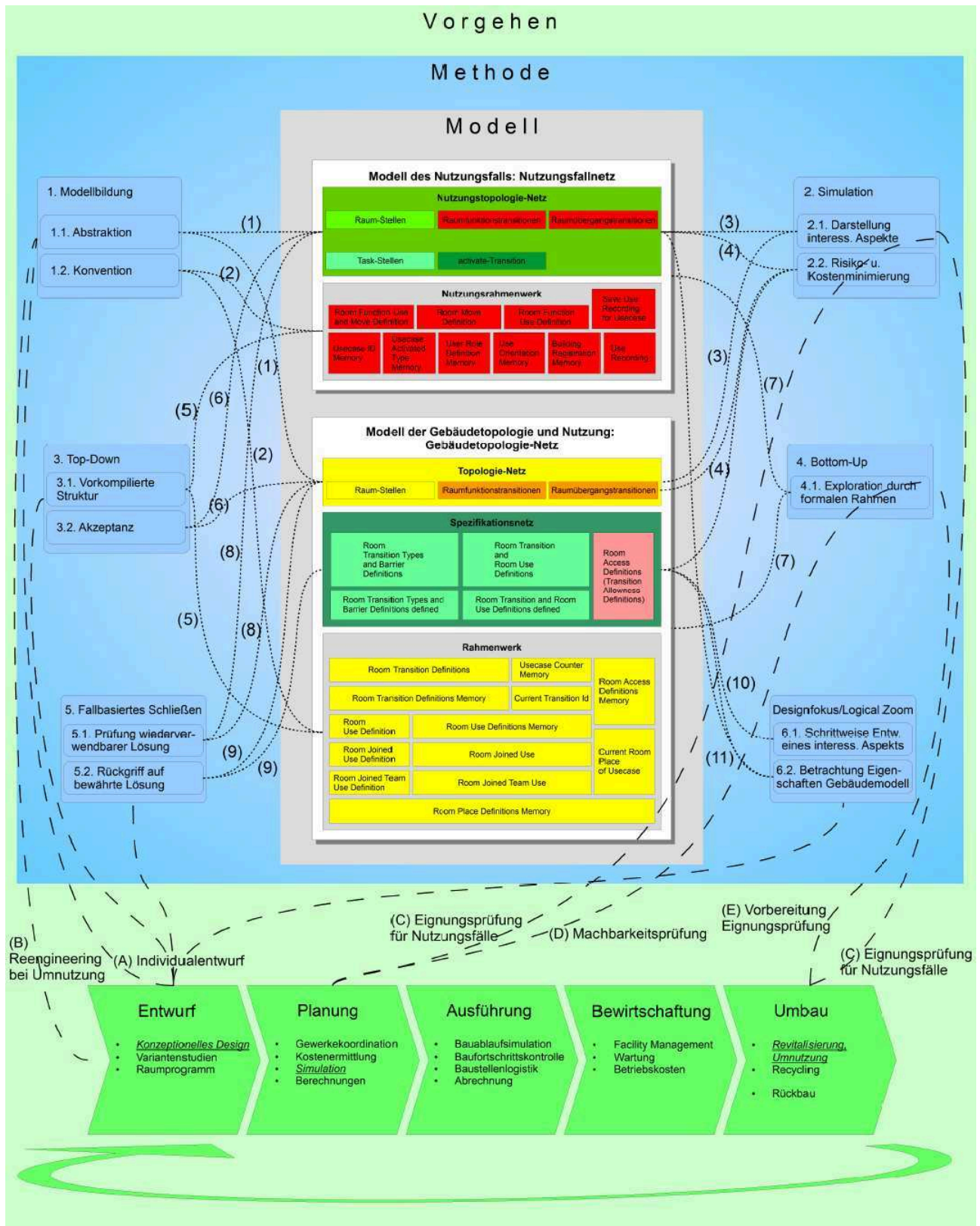


Abbildung 46: Vorgehen: Modellierung mit dieser Methode

5.3.4 Verwendung: Vorgehen im nutzungsorientierten Gebäudeentwurf

Das Modell der Gebäudenutzung als Verbindung der Modelle der Gebäudetopologie und von Nutzungsfällen ist die Basis für mögliche Verwendungen und dort für die Unterstützung des nutzungsorientierten Gebäudeentwurfs. Auf der Basis der in 5.3.3 erläuterten Vorgehensweisen zur Modellierung mit dieser Methode auf Basis des Metamodells der Gebäudenutzung sind unterschiedliche Verwendungen möglich, die in folgende Cluster abstrahiert werden können:

- *Entwurf von Individual- und Spezialbauten*
- *Diagnose*

Die Leitfrage nach der praktischen Verwendung, die hiermit beantwortet wird, ist:

*Wozu im konzeptuellen Gebäudeentwurf
kann die Methode auf Basis des Modells eingesetzt werden und
welches Vorgehen ist bei ihrer Verwendung sinnvoll?*

Zur Beantwortung dieser Frage werden die verschiedenen Verwendungen durch Beschreibungen der Fragestellung, Aufgabe, des Vorgehens und Ergebnisses charakterisiert.

Die *Fragestellung der Verwendung im Entwurf von Individual- und Spezialbauten* lautet: Wie ist die Gebäudetopologie eines zu entwerfenden Gebäudes zu gestalten, so dass eine geforderte Nutzung optimal ermöglicht wird?

Folgende *Aufgaben* sind zur Beantwortung dieser Fragestellung erforderlich:

1. Spezifizierung der Nutzung als Bewegungen im Gebäude und Anwendung von Funktionen in bestimmten Räumen
2. Ableitung einer Gebäudetopologie aus der Nutzungsanforderung.

Die Bearbeitung der Aufgaben wird durch *Vorgehensweisen* zur Modellierung mit der vorgestellten Methode unterstützt:

- Der Individualentwurf bedeutet, dass entsprechend dieser Methode ein Gebäudetopologiemodell entworfen wird. Dies erfolgt unter Verwendung der Methode der Modellbildung, d. h. Unterstützung durch Vorgehen (A) und methodisch durch (1) und (2) in Abbildung 46 und Tabelle 18. Es wird ein iterativ-inkrementelles Vorgehen mit Anwendung der Top-Down-Methode zur Verfeinerung des Topologie-Modells (als Topologie-Netz) und mit Anwendung der Methode Designfokus/Logical Zoom zur Ausarbeitung relevanter Gebäudetopologie-Bestandteile wie Räume, Raumübergänge und Raumfunktionen und ihrer Eigenschaften verwendet. Die Anwendung des Designfokus kann auch auf dem Nutzungsfallmodell basieren, indem Teile des Nutzungstopologie-Netzes Vorlage für den Entwurf von Teilen des Gebäudetopologie-Netzes sind; d. h. Unterstützung durch Vorgehen (A) und methodisch durch Top-Down (5)/(6), Bottom-Up (7) bzw. Designfokus (10) und (11) in Abbildung 46 und Tabelle 18. Zu Beginn der Ausarbeitung des Gebäudetopologiemodells kann die Methode des Fallbasierten Schließens in das Vorgehen einbezogen werden, um wiederverwendbare Modelle oder Teilmodelle anhand der Nutzungsfälle aufzufinden und als Grundlage zu verwenden; d. h. Unterstützung durch Vorgehen (A) und methodisch durch (8) und (9) in Abbildung 46 und Tabelle 18.
- Die Spezifizierung der Nutzungsfälle besteht im Wesentlichen aus der Überführung von schriftlich oder verbal formulierten Beschreibungen in das der Methode zugrunde liegende Modell der Nutzungsfälle. Es ist sinnvoll, iterativ-inkrementell vorzugehen, wobei die

Methoden Top-Down (5) und Bottom-Up (7) angewendet werden. Das Vorgehen ist nicht neu und findet auch bei der Systemmodellierung auf Basis der UML Anwendung [BRJ 2006]. Weiterführende Beschreibungen sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Bezogen auf dieses Modell wird durch Top-Down eine Verfeinerung von Bewegungen im Raum herausgearbeitet und bestimmt, in welchen Räumen welche Funktionsnutzung erwartet wird. Die Bottom-Up-Methode findet Anwendung für Nutzungsbereiche, die funktionale Zusammenhänge mit Bewegungszusammenhängen vereinen, z. B. Küche und Vorratsraum, OP und Vorbereitungsraum, Schlafraum und Bad, Arzt-Rezeption und Warteraum, Arztbehandlungsraum und Labor, Parkhaus-Ein/Ausgang und (Raum mit) Kassenautomat, Labor/Lager/Schleuse. Die Spezifizierung der Nutzungsfälle sollte vor dem Entwurf des Gebäudetopologiemodells erfolgen. Es gibt aber erfahrungsgemäß Wechselwirkungen zwischen beiden Vorgehensschritten, so dass auch hier ein iterativ-inkrementelles Vorgehen beide Schritte verbindet.

- Die Gebäudetopologie wird auf Eignung für die Nutzungsfälle geprüft. Diese Eignungsprüfung ist Bestandteil der Entwurfsphase und erfolgt durch die Methode der Simulation der Nutzungsfall- und Gebäudetopologiemodelle. Die Simulation ist für dieses Vorgehen aus der Planungsphase vorzuziehen, d. h. Unterstützung durch Vorgehen (C) und methodisch durch (3) und (4) in Abbildung 46 und Tabelle 18). Die Prüfung sollte nicht einmalig nach Abschluss des Entwurfs der Modelle erfolgen, sondern in das iterativ-inkrementelle Entwurfsvorgehen integriert werden, um so die Machbarkeit der Realisierung des Entwurfs bei gleichzeitiger Erfüllung der Nutzungsanforderung durch die Gebäudetopologie frühzeitig zu prüfen, d. h. Unterstützung durch Vorgehen (D) und methodisch durch (7) in Abbildung 46 und Tabelle 18.

Die Verwendung der Vorgehensweisen der Modellierung mit dieser Methode führt zu folgenden *Ergebnissen*: Der Entwurf liefert ein vollständiges Modell der Gebäudetopologie, welches die Nutzungsanforderungen erfüllt. Die beschriebene Vorgehensweise umfasst nicht den gestalterischen und konstruktiven/technischen Entwurf. Berücksichtigt werden Eigenschaften der Räume wie Kapazität, der Raumübergänge wie Typen und Barriereangaben und der Zusammenhänge zwischen Räumen und Übergängen wie Bewegungsrichtungen sowie die Funktionen mit Zuordnungen zu Räumen. Wie in 5.2 dargestellt, ist eine Abbildung zwischen dem Gebäudetopologiemodell und einem BIM als Modell des gestalterischen und technischen Entwurfs möglich. Das Gebäudetopologiemodell kann auf zweierlei Arten verwendet werden: Erstens als fixe Rahmenbedingung für einen anschließenden gestalterischen und technischen Entwurf, indem das Modell zur weiteren Werkzeug-gestützten Entwurfstätigkeit in ein BIM übertragen wird. Zweitens kann es in einem iterativ-inkrementellen Entwurfsprozess integriert werden, was im Falle der Werkzeugunterstützung die Integration eines Entwurfswerkzeugs für das Gebäudetopologiemodell mit einem BIM-basierten Entwurfswerkzeug voraussetzt. Diese Verwendung mit einem iterativ-inkrementellen Vorgehen über den konzeptuellen, gestalterischen und technischen Entwurf mit entsprechender Modell- und Werkzeugbasis wäre ein deutlicher Fortschritt. In jedem Fall entstehen als Nebenprodukt der Modellierung Raumbezeichnungen und -typisierungen, die zu einer Begriffshierarchie bzw. Ontologie aufgebaut werden können, sowie die Nutzungsfall-Spezifizierung in Form von einem oder mehreren Nutzungsfallnetzen.

Die *Verwendung zur Diagnose* erfolgt im Zusammenhang mit der *Fragestellung*: Ist ein gegebenes Gebäude bzw. eine Gebäudeeinheit für eine definierte Nutzung geeignet? Der Kontext der Fragestellung ist dabei offen. Beispielsweise kann ein Gebäude für eine bestimmte Nutzung gesucht werden, oder die bisherige Nutzung ändert sich, und die Anpassungsfähigkeit des Gebäudes wird hinterfragt.

Zur Beantwortung sind folgende *Aufgaben* zu bearbeiten:

1. Die Nutzung ist objektiv und möglichst formalisiert zu beschreiben. Die Nutzung ist durch möglicherweise mehrere Nutzungsfälle zu formulieren.
2. Das Gebäude muss formalisiert beschrieben werden, so dass die angebotenen Funktionen pro Raum und die Raumübergänge mit ihren Eigenschaften für die Untersuchung modelliert sind.

Folgendes *Vorgehen* zur Modellierung mit der vorgestellten Methode unterstützt die Bearbeitung der Aufgaben:

- Die formale Beschreibung des Gebäudes erfolgt durch Reengineering der Gebäudetopologie und Modellbildung, d. h. Unterstützung durch Vorgehen (B) und methodisch durch (1) und (2) in Abbildung 46 und Tabelle 18.
- Die formale Beschreibung der Nutzungsfälle wird aus in der Regel verbal oder textuell formulierten Anforderungsbeschreibungen in ein Modell auf der Basis des hier eingeführten Metamodells übertragen. Zusätzlich wird die Formalisierung durch das Vorgehen der Vorbereitung der Nutzungsfälle für die Eignungsprüfung des Gebäudes unter Anwendung der Methode Bottom-Up unterstützt, das bedeutet, dass die Terminologie der Raumübergänge und Funktionen zwischen Nutzungsfällen und Gebäudetopologiemodell abgestimmt wird; d. h. Unterstützung durch Vorgehen (E) und methodisch durch (7) in Abbildung 46 und Tabelle 18. So wird erreicht, dass die Nutzungsfälle mit Blick auf die bestehende Gebäudetopologie im Detail spezifiziert werden. Beispielsweise können Raumbeziehungen in Nutzungsabläufen ausgearbeitet werden, wenn die verbale Anforderungsbeschreibung keine klaren Vorgaben hat oder Freiräume lässt.
- Die Überprüfung der Nutzbarkeit des Gebäudes anhand spezifizierter Nutzungsfälle erfolgt durch das Vorgehen der Eignungsprüfung des Gebäudetopologiemodells für die Nutzungsfälle durch anschauliche Simulation der Gebäudenutzung, d. h. Unterstützung durch Vorgehen (C) und methodisch durch (3) und (4) in Abbildung 46 und Tabelle 18. Bestandteil ist die Machbarkeitsprüfung, die notwendige Anpassungen des Gebäudes und der Nutzungsfälle darstellen kann. Dieser Abgleich ist in 5.3.3 beschrieben im Zusammenhang mit dem Vorgehen in der Phase der Planung, d. h. Unterstützung durch Vorgehen (D) und methodisch durch (7) in Abbildung 46 und Tabelle 18. Die Planung von Anpassungen ist das Ergebnis der Machbarkeitsprüfung, verzahnt mit einer Eignungsprüfung durch Simulation.

Die Verwendung der Vorgehensweisen der Modellierung mit dieser Methode führt zu folgenden *Ergebnissen*: Die Modellbildung liefert ein vollständiges Verständnis der Gebäudetopologie und von Eigenschaften der Räume, Raumübergänge und Funktionsangebote. Ebenso wird eine vollständige und korrekte — im Sinne einer der Nutzeranforderung entsprechenden — Beschreibung der Nutzungsfälle gefördert. Das Simulationsergebnis liefert Anpassungsnotwendigkeiten der Gebäudetopologie, so dass die spezifizierte Nutzung erfolgen kann. Andererseits wird auch durch die Machbarkeitsprüfung deutlich, dass ggf. die Nutzungsfälle angepasst werden müssen, damit das untersuchte Gebäude passend genutzt werden kann.

Die Werkzeugunterstützung der in diesem Abschnitt genannten Verfahren basiert auf dem in 4.4.2 beschriebenen Modellierungs- und Simulationswerkzeug für die hier verwendete Art von Petri Referenznetzen. Insbesondere werden folgende Verfahren in den dargestellten Verwendungen unterstützt. Die Tabelle 19 zeigt die Zuordnung der Werkzeugunterstützung zu der hergeleiteten Verwendung der Verfahren, die auf Methoden und wiederum auf Modellen basieren. Die Unterstützung durch das in dieser Arbeit exemplarisch verwendete Werkzeug Renew [Renew 2015] ist auf die

methodische Ebene ausgerichtet. Die Modellbildung wird durch den graphischen Netzeditor des Werkzeugs unterstützt. Werkzeugunterstützung für die Methode Simulation ist durch die graphische und schrittweise Simulation mit der Möglichkeit der Inspektion von Objekten gegeben. Die vier weiteren Basismethoden werden durch alle Bestandteile des Werkzeugs unterstützt; dies ist auch abhängig von dem verwendeten Verfahren. Beispielsweise wird im Individualentwurf bei der Modellbildung und Ausprägung der Gebäudetopologie nach der Top-Down-Methode die graphische Edition eine passende Unterstützung bieten. Im Fall der Eignungsprüfung der Gebäudetopologie für Nutzungsfälle ist die Methode der Simulation durch das Werkzeug zur graphischen Simulation eine Unterstützung, und verbunden mit einer Exploration einzelner Elemente der Topologie im Zusammenhang mit der Nutzung ist das Werkzeug zur Inspektion der Objekte, also Topologie-Elemente wie Übergangstransitionen oder Raum-Stellen oder Nutzungstopologie-Netze, sehr hilfreich, um das Verständnis für die Eignung des Entwurfs zu erhöhen und Verbesserungsansätze zu erarbeiten.

Eine Integration der vorgestellten Modelle mit BIM⁸⁶ ist Grundlage für eine Werkzeugintegration. Beide sind für die anzustrebende ganzheitliche Modellbildung für die Aufgaben und die Rolle des Architekten als „Information-worker“ [Russell Elger 2008] essentiell. Die Anreicherung des BIM-Konzeptes um die Modellierbarkeit der Gebäudenutzung und die Ergänzung der Aufgaben des Architekten als Übersetzer von Nutzungsanforderungen in ein BIM erfordert die entsprechende Ausstattung eines BIM-Modellierungswerkzeuges mit den Fähigkeiten des hier vorgestellten Realisierungsansatzes. Nur eine Werkzeugunterstützung versetzt den Architekten in die Lage, die Gebäudenutzung handhabbar in die Bildung eines BIM-Gebäudemodells einzubeziehen.

Verwendung	Vorgehen	Methode	Modell	Werkzeugunterstützung		
• Individual- und Spezialbauten • Diagnose	(A) Individual-entwurf	1. Modellbildung	• Gebäudetopologie-Netz inkl. Topologie-Netz, Spezifikationsnetz • Nutzungsfallnetz inkl. Nutzungstopologie-Netz	<i>Graphischer Netzeditor des Werkzeugs</i>		
	(B) Reengineering bei Umnutzung (C) Eignungsprüfung für Nutzungsfälle (D) Machbarkeitsprüfung (E) Vorbereitung Eignungsprüfung	2. Simulation		<i>Graphischer Simulator des Werkzeugs</i> zur: • Nutzungsvisualisierung • anschaulichen Prüfung • Kommunikationsunterstützung. Schrittweise Simulation mit Beeinflussung der Ausführung von Raumübergängen und Funktionsnutzung. <i>Inspektion von Objekten des Werkzeugs</i> zur Analyse: • der Raumbelegung • von Zugangsberechtigungen • der Bewegungsanforderung und von Übergangstyp bzw. Barriere • der Nutzung von Funktionen • des gemeinsamen Nutzungsverhaltens.		
				3. Top-Down 4. Bottom-Up 5. Fallbasiertes Schließen 6. Designfokus/ Logical Zoom	Werkzeug Renew [Renew 2015] exemplarisch	

Tabelle 19: Verwendung und Werkzeugunterstützung

86 Vergleiche 5.2.

5.4 Zusammenfassung

In 5 wird auf der methodischen Modellierungsbasis aus 4 ein Metamodell für die Modellierungsgegenstände des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs in 5.1 entworfen. Dies geschieht auf Basis der Referenznetze, ein Petrinetztyp, der in 4 ausgewählt wurde. Hiermit ist ein Realisierungsansatz gefunden worden, der auch eine Anbindungsmöglichkeit an BIM-Modelle auf Basis IFC bietet, wie in 5.2 dargestellt. Die Unterstützung des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs durch die hier vorgestellte Methode wird durch die aufeinander aufbauenden Konzepte Modell, Methode, Vorgehen und Verwendung in 5.3 ausgearbeitet. Dieses Metamodell ist Basis für die Modellierung eines Gebäudes bzw. seiner Topologie, seiner Nutzung, von Nutzungsfällen und der Gebäudenutzung wie in 5.3.1 dargestellt. Die methodische Vorgehensweise auf der Grundlage von Basismethoden des Architekturentwurfs wird in 5.3.2 und 5.3.3 beschrieben. In 5.3.4 werden mögliche Verwendungen aufgezeigt.

In 6 wird anhand von Beispielen die Verwendung veranschaulicht.

6 Verwendung in Beispielen

„Gedanken ohne Inhalt sind leer, Anschauungen ohne Begriffe sind blind.“⁸⁷

Die vorgestellte Modellierungsmethode wird anhand von zwei ausführlichen Beispielen für zwei wesentliche Verwendungen vorgestellt. Hierbei werden die Modellelemente und die methodischen Vorgehensweisen detailliert dargestellt. In diesen Beispielen wird das jeweilige Ergebnis reflektiert und aus den Erfahrungen der Verwendung werden Vorschläge für weitere Arbeiten abgeleitet. Schließlich werden anhand von Beispielen weitere Verwendungsmöglichkeiten skizziert, die das Potenzial des vorgestellten Ansatzes beschreiben.

6.1 Verwendung im Entwurf am Beispiel eines Einfamilienhauses

Zur Demonstration der Verwendung der Methode im Entwurf wird hier ein einfaches Beispiel gewählt, welches aufgrund seiner allgemein verständlichen Anwendung nachvollziehbar ist und die Aufmerksamkeit auf das methodische Vorgehen sowie die Modellierungsbasis und den Realisierungsansatz richtet. Das Beispiel wurde in 2.2 zur Einleitung und Motivation eingeführt. Orientiert an der Verwendungsbeschreibung in 5.3.4 lautet die *Fragestellung* für diese *Verwendung im Entwurf eines Individualbaus*: Wie ist die Gebäudetopologie eines zu entwerfenden Gebäudes zu gestalten, so dass eine geforderte Nutzung optimal ermöglicht wird? Zur Beantwortung sind folgende Schritte zu gehen:

1. Lösung der *Aufgaben* zur Beantwortung dieser Fragestellung:
 - Spezifizierung der Nutzung als Bewegungen im Gebäude und Anwendung von Funktionen in bestimmten Räumen
 - Ableitung einer Gebäudetopologie aus der Nutzungsanforderung.
2. Die Bearbeitung der Aufgaben soll auf Basis des methodischen Vorgehens aus 5.3.3 erfolgen.

Die Bearbeitung wird durch *Vorgehensweisen* zur Modellierung mit der vorgestellten Methode unterstützt, hier durch Vorgehen (A) für den Individualentwurf und methodisch durch (1) und (2) unterstützt, also Abstraktion und basierend auf den Rahmenwerken für eine Gebäudetopologie und Nutzungsfälle.⁸⁸ Zunächst werden die Nutzungsfälle für die Gegenwart und die spätere Umnutzung des zu entwerfenden Gebäudes aufgestellt. Die textuell formulierten Anforderungen an die Nutzung werden als Nutzungsfälle in ein graphisches Modell auf Basis dieser Methode überführt. Dies erfolgt methodisch durch (5) und (6), also auf Basis der Rahmenwerke als vereinfachende Strukturvorgabe und durch graphische Modellierung.

Begonnen wird mit der Modellbildung der Nutzungsfälle der Gegenwart. Die Bewohner, die die Anforderungen an die nach Fertigstellung des Wohnhauses erfolgende Nutzung stellen, bilden eine Familie mit zwei Kindern. In diesem Szenario sei eine langfristige Nutzung bis ins Alter der Eltern geplant. Daher sei auf eine Vermeidung von Treppen zu achten, und eine Nutzung durch gehbehinderte Menschen sei mit wenig Aufwand eines Umbaus zu ermöglichen.

⁸⁷ Immanuel Kant: Kritik der reinen Vernunft I, 2, 1. Von der Logik überhaupt.

⁸⁸ In den folgenden Ausführungen wird mit den geklammerten Buchstaben und Ziffern stets auf Abbildung 46, S. 153, und Tabelle 18, S. 150, der Abschnitte 5.3.3 bzw. 5.3.2 verwiesen.

Es werden konkret folgende Anforderungen als Nutzungsfälle beschrieben, die wie folgt nummeriert sind:

1. Die Einkäufe können über einen direkten Zugang aus der Garage ohne Stufen und Schwellen in einen Vorratsraum gebracht werden, der Nachbarraum der Küche ist.
2. Für die Gartenarbeit sollen in einem Raum Geräte und Grünbehälter gelagert werden können. Der Zugang soll direkt vom Garten aus erfolgen. Es fällt auf, dass es praktisch wäre, wenn ein Waschplatz, besser eine Duschmöglichkeit und möglichst eine Toilette aus dem Garten erreichbar wäre, ohne mit schmutziger Kleidung durch mehrere Räume wie Wohnzimmer oder Empfangsbereiche laufen zu müssen.
3. Für Besucher ist ein Gästezimmer gedacht, welches möglichst einen direkten Zugang zu einem Duschbad hat und am „öffentlichen“ Flur liegt, von dem das Wohnzimmer erreichbar ist.
4. Der Elternbereich soll aus Schlafzimmer, Bad und Umkleidebereich bestehen. Ein Übergang vom Schlafzimmer zum Umkleidebereich und von dort zum Bad soll durch eine Tür führen. Der Elternbereich soll zu anderen Räumen oder Fluren durch Türen getrennt sein.
5. Als Freund der Privatsphäre und eines grünen, aber pflegeleichten Aufenthaltsbereichs im Freien wünscht sich der Bauherr eine große Terrasse, die vom Wohnzimmer, Elternbereich, den zwei Kinderzimmern und auch vom Flur für Gäste zugänglich ist.

Nach dem oben genannten Vorgehen wird für jeden Nutzungsfall ein Modell gebildet.

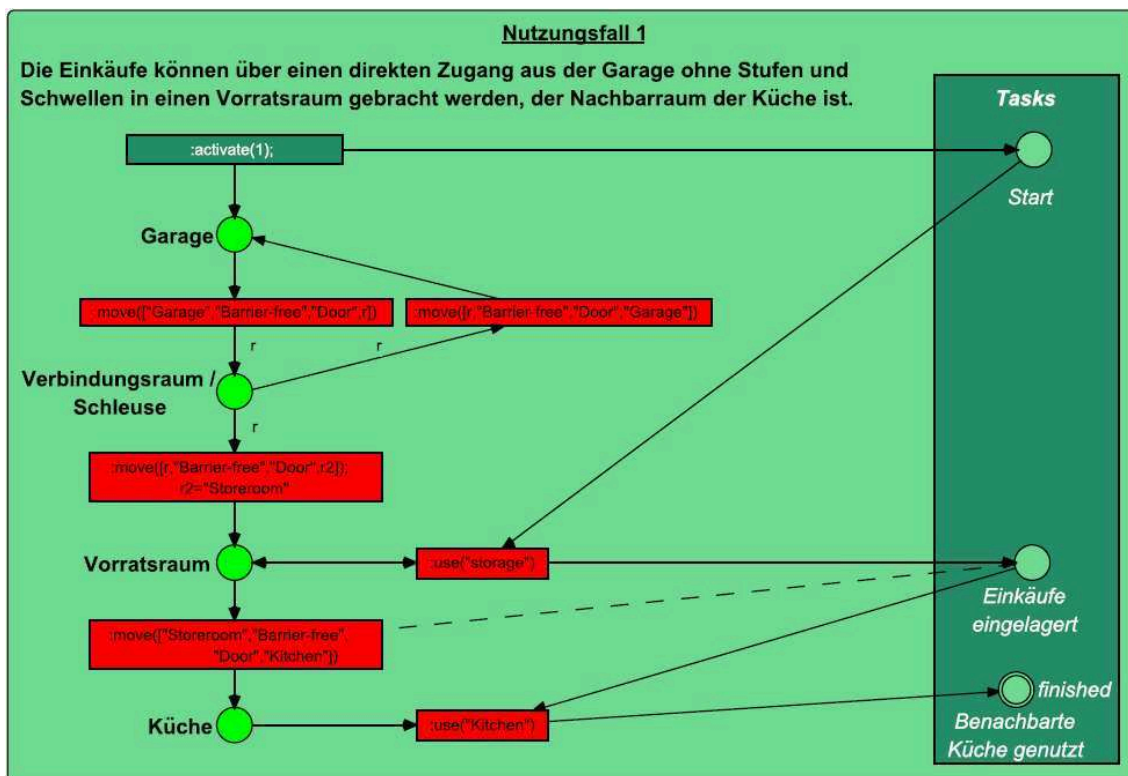


Abbildung 47: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 1

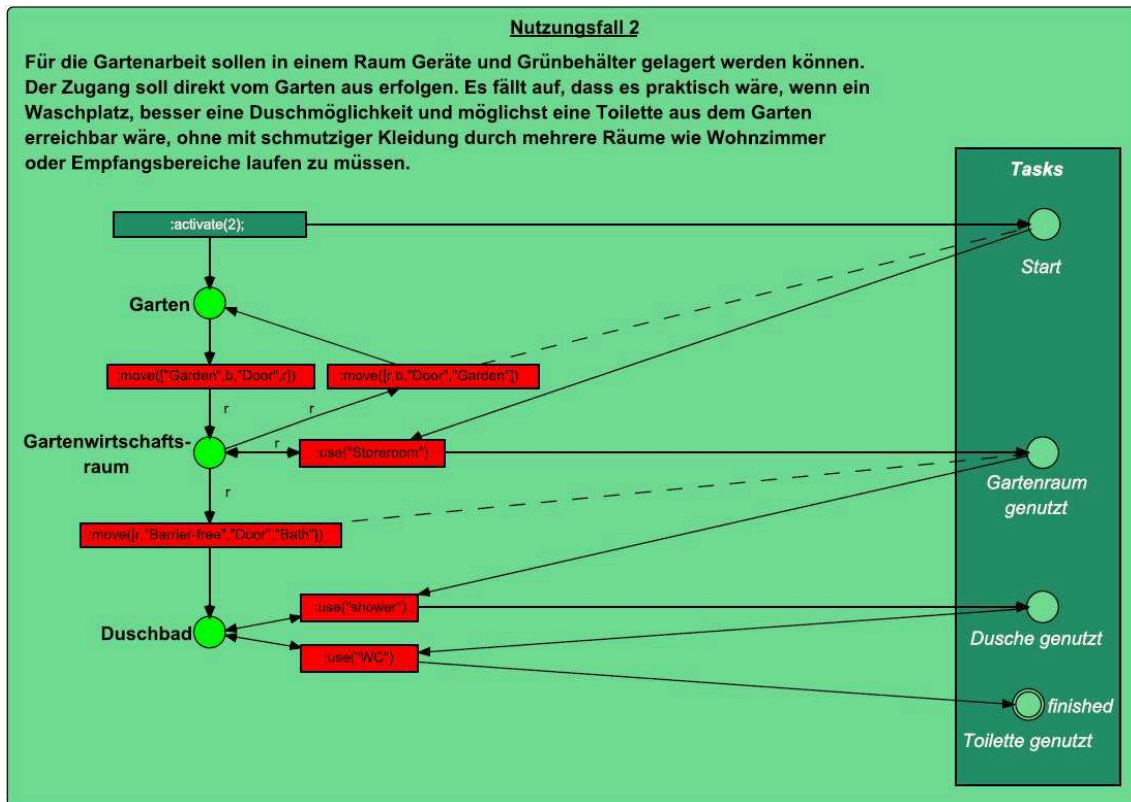


Abbildung 48: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 2

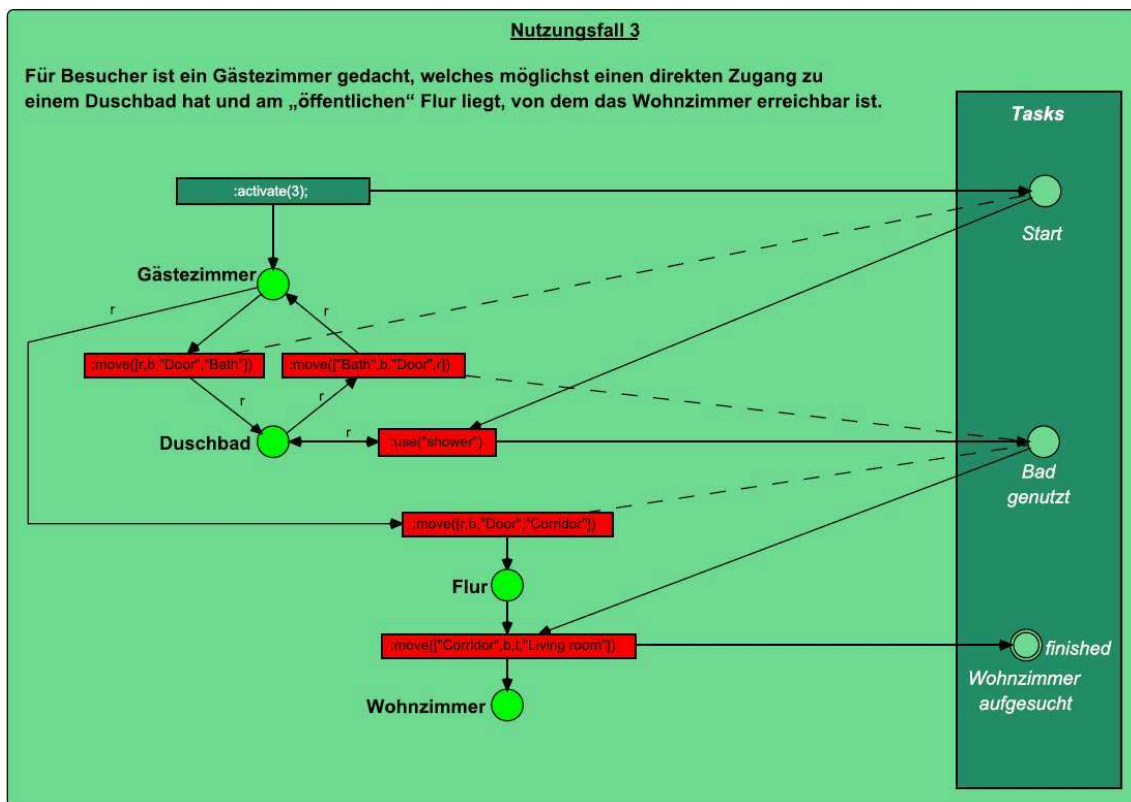


Abbildung 49: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 3

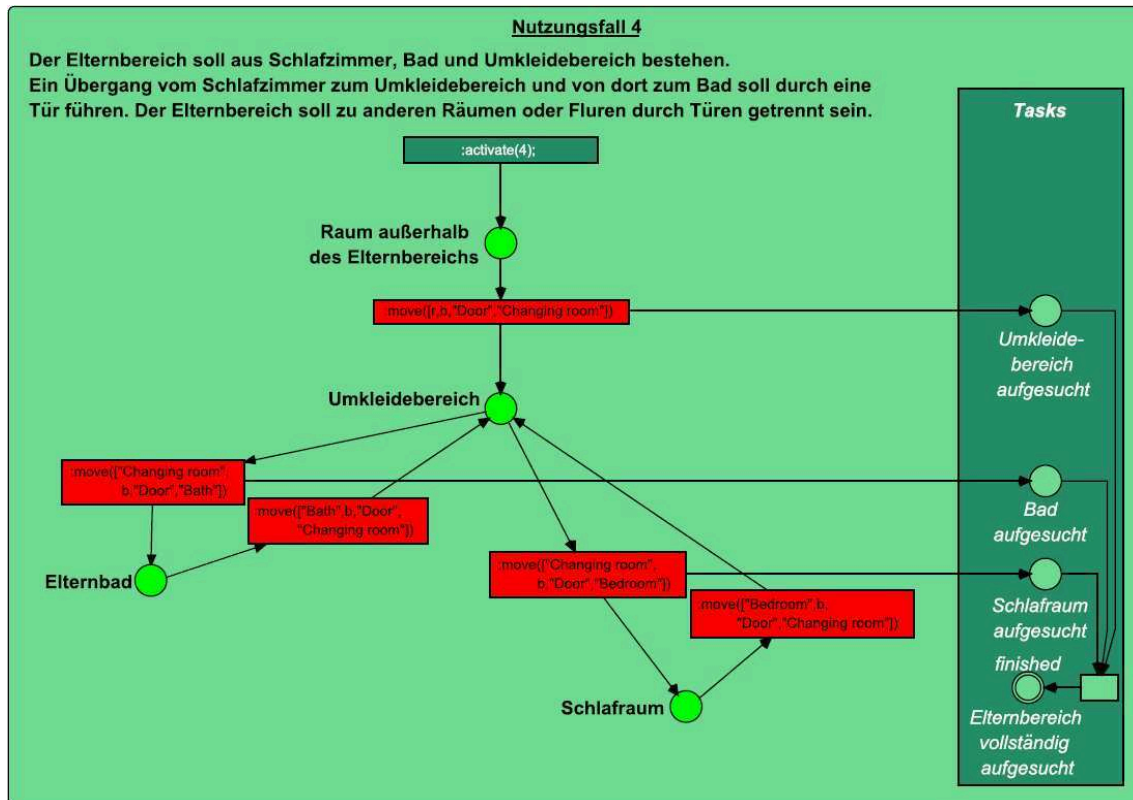


Abbildung 50: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 4

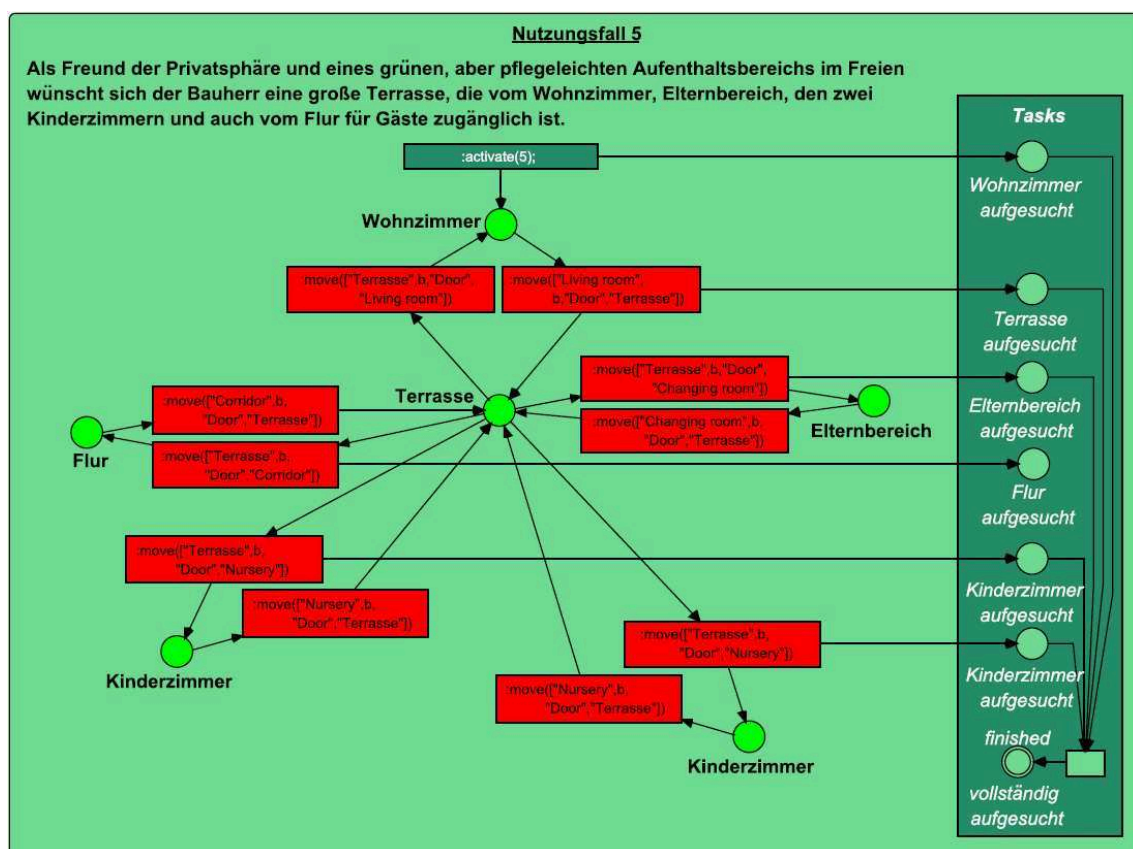


Abbildung 51: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 5

Nach Vorlage der Nutzungsfallmodelle wird hinsichtlich des jeweiligen interessierenden Gesichtspunktes des Nutzungsfalls — methodisch Designfokus (10) — die Gebäudetopologie modelliert. Die Anwendung von Designfokus basiert auf dem Nutzungsfallmodell, indem hier Teile des Nutzungstopologie-Netzes Vorlage für den Entwurf von Teilen des Gebäudetopologie-Netzes sind. Hierbei erfolgt eine Herleitung von Ausschnitten des Topologie-Netzes der Gebäudetopologie aus dem Nutzungstopologie-Netz, welches zum jeweiligen Nutzungsfall gehört, der im Interesse des Gesichtspunktes steht.

Zunächst wird aus dem Text ein formales Modell des Nutzungsfalls in Form eines Nutzungstopologie-Netzes hergeleitet. Dies ist für die fünf exemplarischen Nutzungsfälle erfolgt, indem Abläufe und Bewegungs- sowie Funktionsnutzungsanforderungen im Text identifiziert und in die graphische Notation des Netzes abgebildet wurden. Dies ähnelt der Modellierung von Ablaufbeschreibungen in graphischer Form. Die grünen Stellen repräsentieren Räume und die roten Transitionen die Raumübergänge oder Funktionsnutzungen. Zu verstehen ist ein solches Nutzungstopologie-Netz als Anforderung an die Nutzung des Gebäudes oder eines Gebäudeabschnittes.

Im zweiten Schritt wird auf Basis jedes Nutzungstopologie-Netz Bottom-Up (7) ein Teil der Gebäudetopologie abgeleitet. Die topologischen Zusammenhänge sind eine Vorlage für Ausschnitte der Gebäudetopologie. Aber es werden nur die angeforderten Zusammenhänge spezifiziert. In den fünf Beispielen wird dies deutlich, wenn man jeweils Nutzungstopologie-Netz und den Ausschnitt des Gebäudetopologiemodells betrachtet. In den Nutzungsfällen sieht man eine Übernahme der Topologie, während aber offen bleibt, wie die weiteren Übergänge zwischen den ausschnittsweise dargestellten Räumen definiert sind. Beispielsweise bleibt die weitere topologische Beziehung der Küche im aus Nutzungsfall 1 abgeleiteten Ausschnitt der Gebäudetopologie oder die Beziehungen der Räume Living room, Corridor1 und 2 und Bedroom2 und 3 im aus Nutzungsfall 5 abgeleiteten Ausschnitt undefiniert. Die einzelnen Ausschnitte der Gebäudetopologie bilden größere Einheiten, die Bottom-Up aus den Nutzungsfällen abgeleitet wurden. In den Beispielen sind dies Nutzungsbereiche, die funktionale Zusammenhänge mit Bewegungszusammenhängen vereinen, z. B. der Raumkomplex Garage/Vorratsraum/Küche zur Bewirtschaftung im Nutzungsfall 1 oder der Elternbereich im Nutzungsfall 4. Weitere Nutzungsfälle bzw. ihre aus den Anforderungen abgeleiteten topologischen Strukturbildungen unterstützen die weitere Ausbildung der gesamten Gebäudetopologie. In diesem Schritt wird das Topologie-Netz der Gebäudetopologie also iterativ-inkrementell nach der Bottom-Up-Methode (7) entwickelt. Für undefinierte topologische Zusammenhänge ist der Architekt gefordert, Gestaltungen auf Basis weiterer Eingaben einzubringen, seien sie begründet durch Gestaltung, durch technische Vorgaben oder Richtlinien oder weitere Vorgaben oder durch Fallbasiertes Schließen (8), (9). In den Entwurf geht auch die Anforderung des Raumprogramms ein. Dieses ist Ausgangspunkt für eine Vorgehensweise nach der Top-Down-Methode (5). Im Beispiel seien folgende Räume geplant: Wohnzimmer, Gästezimmer/Büro mit Bad, zwei Kinderzimmer, evtl. ein Bad für die Kinder, Elternbereich aus Schlafzimmer, Bad und Umkleibereich, Küche mit Vorrats-/Wirtschaftsraum, WC und Nutzräume für Wäsche, Gartengeräte und Heizungs-/Technikraum. Die Ableitung eines Grundrisses kann unter Rückgriff auf bereits geplante Wohnhäuser geschehen, jedoch unterstellt dies, dass die damit erfüllten Nutzungsanforderungen auch für diese Nutzung gelten. Diese Methode erlaubt es nun, die Nutzungsanforderungen formal zu beschreiben und die Gebäudetopologie herzuleiten. Das Raumprogramm wird berücksichtigt, um die Bottom-Up hergeleiteten Topologie-Abschnitte auf Vollständigkeit der Räume zu prüfen und die Abschnitte zusammenzusetzen, sofern Freiheitsgrade gegeben sind, die durch keine Nutzungsvorgabe beschränkt werden.

Im dritten Schritt werden nach Vorgehen (C) Eignungsprüfung die Ausschnitte des Gebäudetopologiemodells auf die Unterstützung der jeweiligen Nutzungsfälle geprüft. Dazu wird die Methode der Simulation (3) und (4) angewendet. Auf Basis des in 5.1.5 beschriebenen Modells der

Gebäudenutzung werden Nutzungsfallnetze an der interessierenden Stelle in die Gebäudetopologie eingebracht (injiziert) und durch Simulation jedes modellierten Ausschnittes (11) geprüft, ob die beschriebene Nutzung ermöglicht wird. Mit Hilfe des Petrinetz-Simulators wird die Gebäudenutzung simuliert. Dabei wird entsprechend der Initialisierung der Gebäudenutzung für die Rolle und Nutzungsorientierung des Nutzungsfalls der aktivierte Typ des Nutzungsfalls als Elementnetzinstanz in das Gebäudetopologie-Netz als Systemnetz eingebracht und durch dieses automatisiert oder manuell schrittweise durch Raumübergangs- oder Funktionsnutzungstransitionen von Raum-Stelle zu Raum-Stelle geschaltet.

Wie im Modell der Gebäudenutzung definiert, gibt das Nutzungsfallnetz die gewünschten Raumübergänge oder Funktionsnutzungen vor und repräsentiert durch diese operationale Sicht die Nutzungsanforderungen in der Gebäudenutzung. Die Beispiele zeigen in den folgenden Abbildungen 52 bis 61 die Ausschnitte des Gebäudetopologiemodells und der Simulationsergebnisse zu jedem der fünf Nutzungsfälle, deren Nutzungstopologie-Netze in den Abbildungen 47 bis 51 dargestellt sind.

Die Simulationsergebnisse werden durch die jeweils finalisierte Nutzungsfallnetzinstanz als Rohdatei erzeugt. Eine erzeugte Rohdatei protokolliert die Bewegungen und Raumfunktionsnutzungen, die eine erfolgreiche Nutzung des Ausschnitts des Gebäudetopologiemodells durch das Nutzungsfallmodell repräsentieren und damit eine den Nutzungsanforderungen entsprechende Nutzungsabfolge dokumentieren.⁸⁹

In den Bewegungsprotokollen wird sichtbar, welche Bewegungen die Nutzungsfallnetzinstanz im Gebäudetopologie-Netz genommen hat und welche Funktionsangebote die Funktionsanforderungen erfüllt haben. Es wird auch der Nichtdeterminismus der operationalen Semantik der zugrunde liegenden Petrinetze deutlich, nämlich dadurch, dass die Auswahl einer aus mehreren schaltbereiten Transitionen, d. h. aus mehreren Raumübergängen oder Raumfunktionstransitionen, zufällig erfolgt⁹⁰. Zwar kann durch das Modell der Nutzungsorientierung⁹¹ die Auswahlwahrscheinlichkeit zwischen zur Wahl stehender Raumübergangstransition und Funktionstransition beeinflusst werden. Jedoch ist eine Steuerung der Auswahl zwischen verschiedenen Raumübergangstransitionen nach einem vorgezeichneten Navigationsplan nicht Teil des Modells. Daher erscheinen die Bewegungen, wie in den Protokollen zu sehen, nicht zielgerichtet. Letztlich ist aber für die Prüfung der grundsätzlichen Nutzungsanforderung nicht wichtig, welche „unnötigen“ Bewegungen erfolgen, solange der durch das Nutzungsfallnetz spezifizierte angeforderte Bewegungsablauf und die in diesem Ablauf geforderten Funktionsnutzungen geprüft und bestätigt werden. Für die Nutzungsfälle 1 bis 3 des Beispiels ist aufgrund der definierten Bewegungsanforderung und Übereinstimmung von Nutzungstopologie-Netz und des jeweiligen Ausschnitts der Gebäudetopologie im Protokoll eine Bewegungsabfolge ohne „unnötige“ Bewegungen zu sehen. Dagegen wird durch die Nutzungstopologie-Netze der Nutzungsfälle 4 und 5 keine Bewegungsabfolge durch die im Nutzungsfall genannten Räume festgelegt. Das Nutzungstopologie-Netz schreibt während der Simulation nicht vor, welche von mehreren möglichen Raumübergangstransitionen gewählt werden soll, so dass die Auswahl zufällig getroffen wird, wodurch nicht zwangsläufig die kürzeste Folge an Bewegungsschritten gewählt wird.

89 Die Rohform zeigt als Einträge die einzelnen Datensätze für jeden Nutzungsschritt, wobei die Reihenfolge der Einträge in der Datei durch den Nichtdeterminismus des erzeugenden Petrinetzes zufällig ist. Anhand der Nr. des Eintrags kann die tatsächlich erfolgte Nutzungsreihenfolge nachvollzogen werden. Die nicht deterministische Reihenfolge der in die Datei geschriebenen Einträge führt zu einer nicht direkt gut lesbaren, wenn auch vollständigen Aufzählung. Mit einem gängigen Tabellenkalkulationsprogramm lässt sich sehr einfach diese Rohdatei umwandeln in eine sortierte Darstellung der Datensätze. Hier wurde Apache OpenOffice Calc [OpenOffice 2017] verwendet.

90 Vergleiche 4.4.1.

91 Vergleiche 5.1.4.

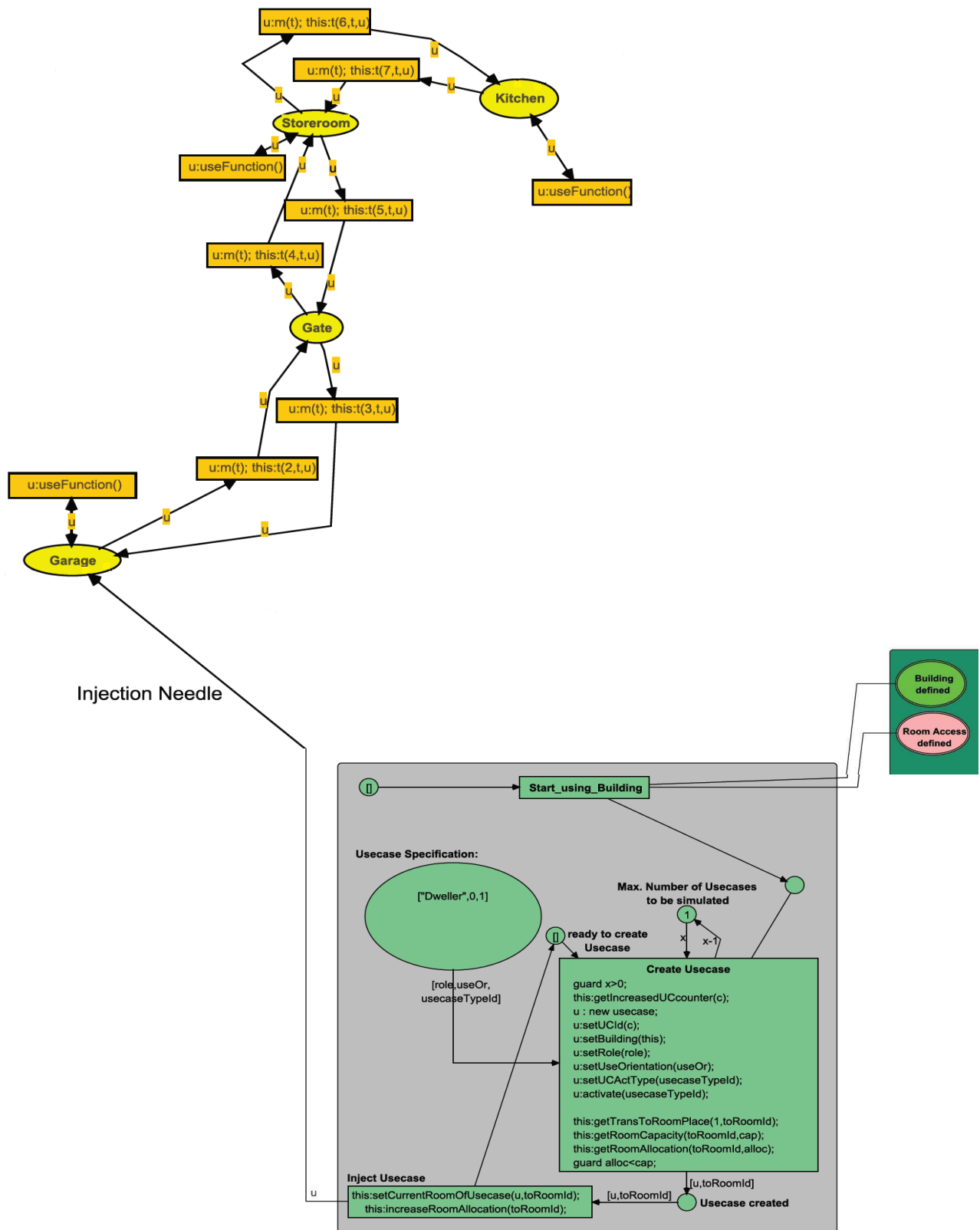


Abbildung 52: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Ausschnitt Gegenwart 1

Rohdatei:

```
Nr, Usecase, Act.-Type, Role, Use-Or., Use, Specification1, Specification2
3, 1, 1, Dweller, 0, Transition: 6, [6-Storeroom,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
1, 1, 1, Dweller, 0, Transition: 4, [7-Gate,Barrier-free,Door,6-Storeroom]
0, 1, 1, Dweller, 0, Transition: 2, [8-Garage,Barrier-free,Door,7-Gate]
2, 1, 1, Dweller, 0, Function: storage
4, 1, 1, Dweller, 0, Function: Kitchen
```

Aufbereitete Datei:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Nr	Usecase	Act.-Type	Role	Use-Or.	Use	Specification1	Specification2
2	0	1	1	Dweller	0	Transition: 2		[8-Garage,Barrier-free,Door,7-Gate]
3	1	1	1	Dweller	0	Transition: 4		[7-Gate,Barrier-free,Door,6-Storeroom]
4	2	1	1	Dweller	0	Function: storage		
5	3	1	1	Dweller	0	Transition: 6		[6-Storeroom,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
6	4	1	1	Dweller	0	Function: Kitchen		

Abbildung 53: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 1, Simulationsergebnis

Nach den aufgeführten Diagrammen und Simulationsprotokollen für die Nutzungsfälle 1 bis 5 werden die Nutzungsfälle für eine in der Zukunft liegende veränderte Nutzung betrachtet.

Für die Simulation der Gebäudenutzung des Nutzungsfalls 2 wurde eine Nutzungsorientierung mit dem Wert 10 spezifiziert, die einer Nutzung einer angebotenen Funktion den Vorrang vor einer in gleicher Raum-Stelle möglichen Raumübergangstransition gibt. Aufgrund der eng gefassten Definition des Nutzungsfalls hat dies keinen Einfluss auf das Simulationsergebnis. In den später betrachteten Nutzungsfällen 61–63 ist diese Spezifikation einflussreich.

Für den Entwurf des Einfamilienhauses bedeutet dieses Ergebnis, dass eine Garage mit direktem Zugang über eine Schleuse bzw. einen Wirtschaftsraum, der an die Küche anschließt, vorzusehen ist.

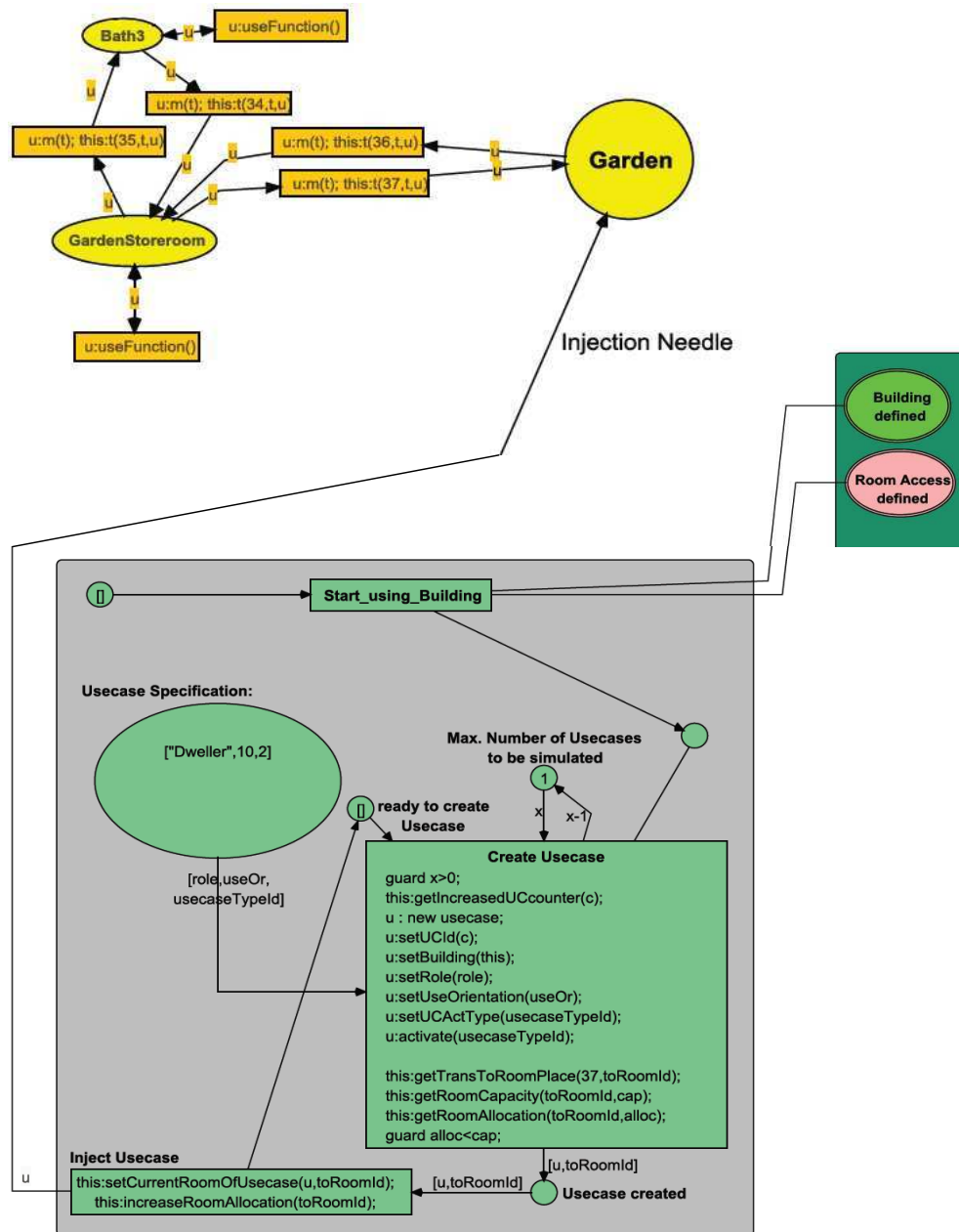


Abbildung 54: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Ausschnitt Gegenwart 2

Rohdatei:

```

0, 1, 2, Dweller, 10, Transition: 36, [21-Garden,Barrier,Door,4-GardenStoreroom]
2, 1, 2, Dweller, 10, Transition: 35, [4-GardenStoreroom,Barrier-free,Door,3-Bath3]
Nr, Usecase, Act.-Type, Role, Use-Or., Use, Specification1, Specification2
4, 1, 2, Dweller, 10, Function: WC
1, 1, 2, Dweller, 10, Function: Storeroom
3, 1, 2, Dweller, 10, Function: shower

```

Aufbereitete Datei:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Nr	Usecase	Act.-Type	Role	Use-Or.	Use	Specification1	Specification2
2	0	1	2	Dweller	10	Transition: 36		[21-Garden,Barrier,Door,4-GardenStoreroom]
3	1	1	2	Dweller	10	Function: Storeroom		
4	2	1	2	Dweller	10	Transition: 35		[4-GardenStoreroom,Barrier-free,Door,3-Bath3]
5	3	1	2	Dweller	10	Function: shower		
6	4	1	2	Dweller	10	Function: WC		

Abbildung 55: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 2, Simulationsergebnis

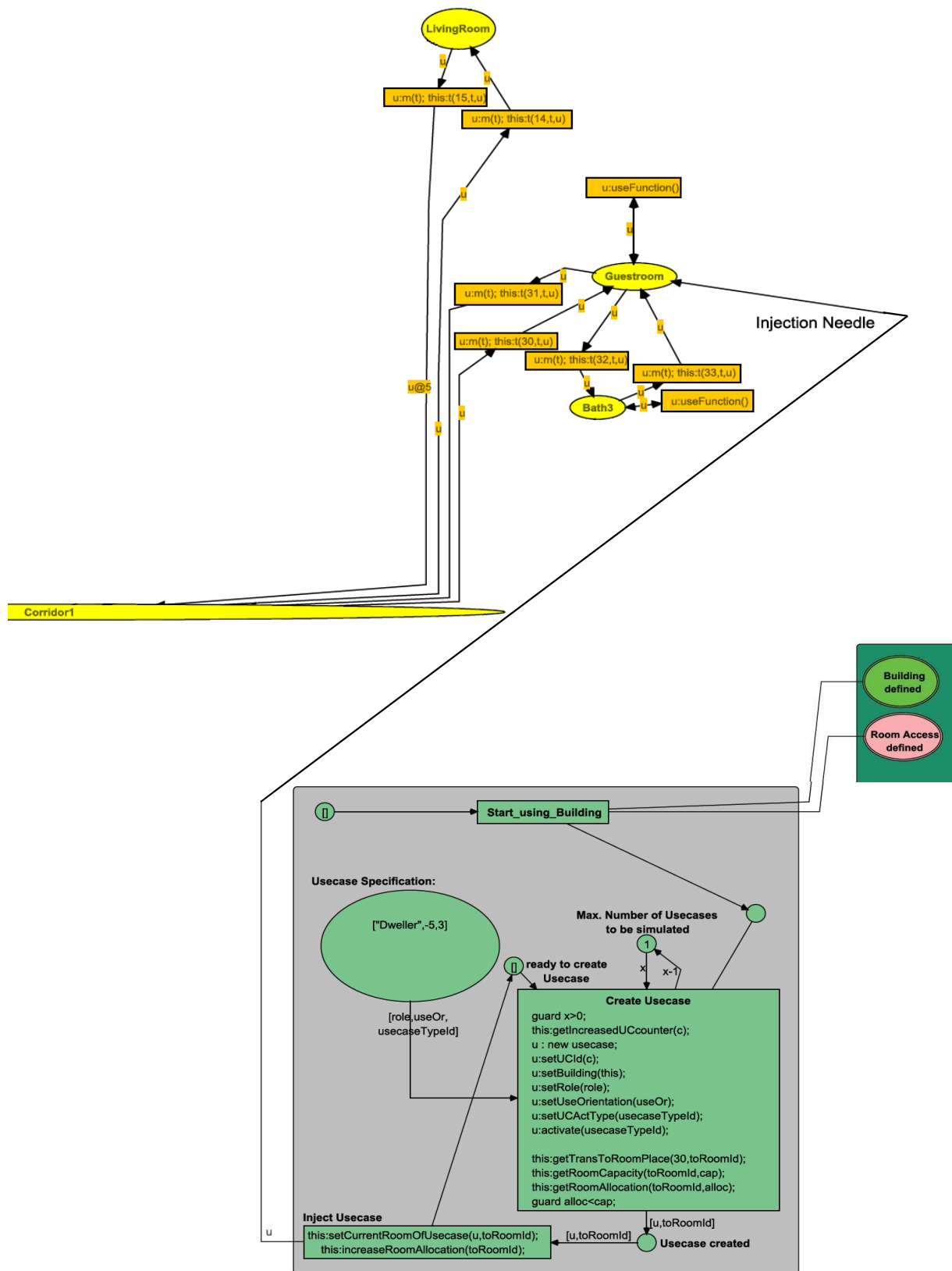


Abbildung 56: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Ausschnitt Gegenwart 3

Rohdatei:

```

2, 1, 3, Dweller, -5, Transition: 33, [3-Bath3,Barrier-free,Door,2-Guestroom]
0, 1, 3, Dweller, -5, Transition: 32, [2-Guestroom,Barrier-free,Door,3-Bath3]
4, 1, 3, Dweller, -5, Transition: 14, [9-Corridor1,Barrier-free,Hall,1-LivingRoom]
3, 1, 3, Dweller, -5, Transition: 31, [2-Guestroom,Barrier,Door,9-Corridor1]
Nr, Usecase, Act.-Type, Role, Use-Or., Use, Specification1, Specification2
1, 1, 3, Dweller, -5, Function: shower

```

Aufbereitete Datei:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Nr	Usecase	Act.-Type	Role	Use-Or.	Use	Specification1	Specification2
2	0	1	3	Dweller	-5	Transition: 32		[2-Guestroom,Barrier-free,Door,3-Bath3]
3	1	1	3	Dweller	-5	Function: shower		
4	2	1	3	Dweller	-5	Transition: 33		[3-Bath3,Barrier-free,Door,2-Guestroom]
5	3	1	3	Dweller	-5	Transition: 31		[2-Guestroom,Barrier,Door,9-Corridor1]
6	4	1	3	Dweller	-5	Transition: 14		[9-Corridor1,Barrier-free,Hall,1-LivingRoom]

Abbildung 57: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 3, Simulationsergebnis

Die Spezifikation der Nutzungsorientierung durch den Wert -5 gibt einer möglichen Bewegung den Vorrang vor einer angebotenen Funktionsnutzung. Wie im Nutzungsfall 2 hat dies aufgrund der eng gefassten Definition des Nutzungsfalls keinen Einfluss auf das Simulationsergebnis.

Der Ausschnitt der Gebäudetopologie ist Vorlage für einen Entwurf, der ein Gästezimmer mit angeschlossenem Bad vorsieht, welches über einen Flur einen Zugang zum Wohnzimmer hat.

Die folgenden Nutzungsfälle 4 und 5 beschreiben die Nutzungsanforderungen nur durch Bewegungen entlang von Raumübergängen zwischen gewünschten Räumen. Eine geforderte Funktionsnutzung wird nicht spezifiziert. Die Angabe der Nutzungsorientierung hat daher keine Bedeutung und wird mit dem Wert 0 neutralisiert. Wie zuvor schon bemerkt, zeigen die Protokolle mehrmalige Raumbesuche bevor alle geforderten Räume über die geforderten Raumübergänge aufgesucht wurden und der Nutzungsfall erfolgreich geprüft werden konnte.

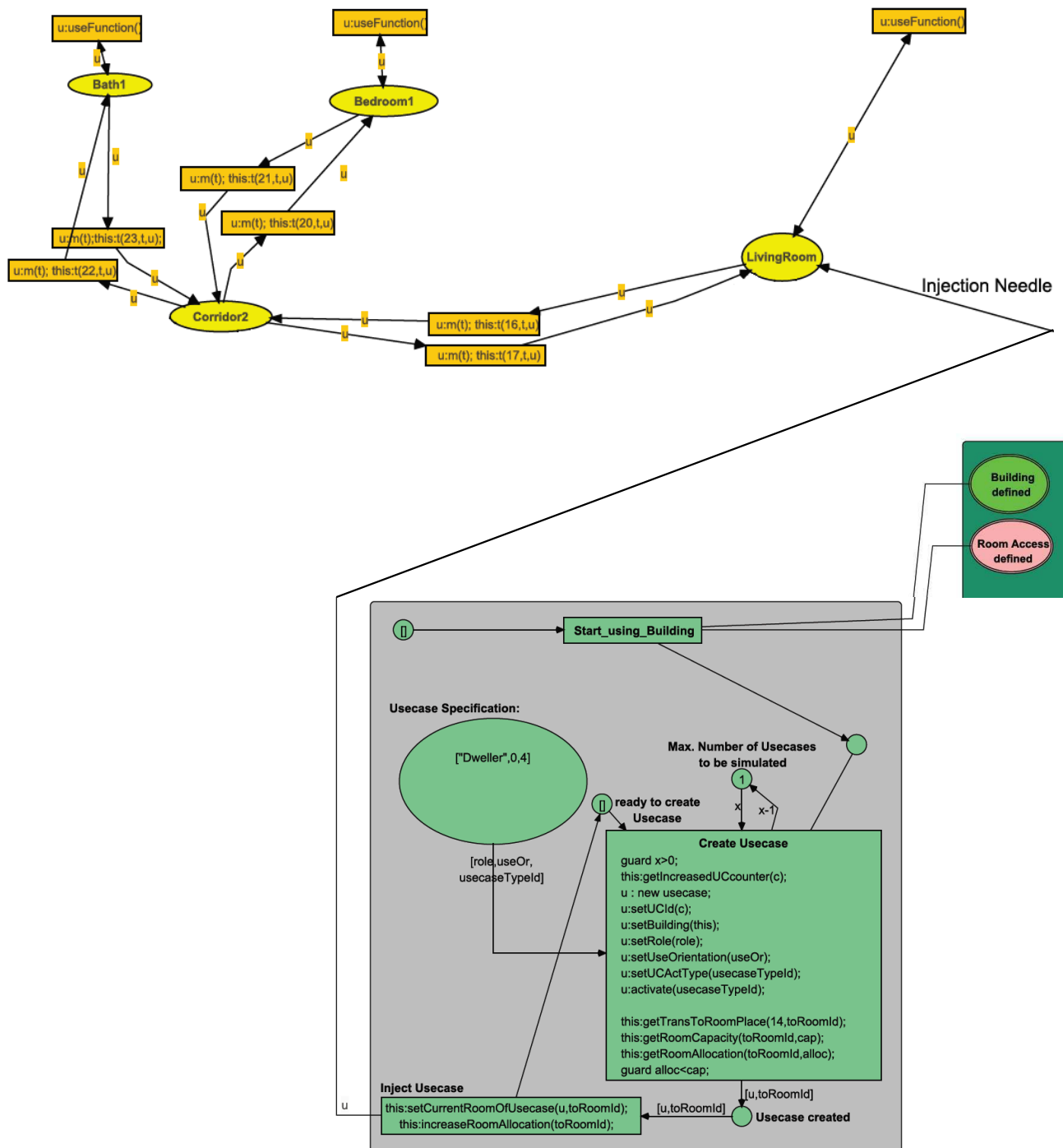


Abbildung 58: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Ausschnitt Gegenwart 4

Rohdatei:

```
6, 1, 4, Dweller, 0, Transition: 21, [19-Bedroom1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
0, 1, 4, Dweller, 0, Transition: 16, [1-LivingRoom,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
5, 1, 4, Dweller, 0, Transition: 20, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,19-Bedroom1]
7, 1, 4, Dweller, 0, Transition: 22, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
2, 1, 4, Dweller, 0, Transition: 21, [19-Bedroom1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
Nr, Usecase, Act.-Type, Role, Use-Or., Use, Specification1, Specification2
4, 1, 4, Dweller, 0, Transition: 21, [19-Bedroom1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
1, 1, 4, Dweller, 0, Transition: 20, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,19-Bedroom1]
3, 1, 4, Dweller, 0, Transition: 20, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,19-Bedroom1]
```

Aufbereitete Datei:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Nr	Usecase	Act.-Type	Role	Use-Or.	Use	Specification1	Specification2
2	0	1	4	Dweller	0	Transition: 16		[1-LivingRoom,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
3	1	1	4	Dweller	0	Transition: 20		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,19-Bedroom1]
4	2	1	4	Dweller	0	Transition: 21		[19-Bedroom1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
5	3	1	4	Dweller	0	Transition: 20		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,19-Bedroom1]
6	4	1	4	Dweller	0	Transition: 21		[19-Bedroom1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
7	5	1	4	Dweller	0	Transition: 20		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,19-Bedroom1]
8	6	1	4	Dweller	0	Transition: 21		[19-Bedroom1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
9	7	1	4	Dweller	0	Transition: 22		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]

Abbildung 59: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 4, Simulationsergebnis

Das Ergebnis des Entwurfs der Topologie für Nutzungsfall 4 gibt vor, dass ein separater Bereich aus Umkleidebereich, Schlafraum und Bad geschaffen werden soll, wobei der Umkleidebereich wie ein Flur der Erschließung der anderen beiden Räume dient.

Der Nutzungsfall 5 beschreibt den Zugang einer Terrasse von zahlreichen Wohnräumen. Eine Gebäudetopologie mit diesen Raumübergängen legt die Anordnung der Räume um eine Terrasse nahe, die an ein Atrium denken lässt. In dem Ausschnitt der Gebäudetopologie ist dieser Raum entsprechend benannt. Das Simulationsergebnis zeigt, dass von allen Räumen aus über die entsprechenden Raumübergangstransitionen die Terrasse erreicht wird. Der Entwurf des Hauses sollte daher ein Atriumhaus anstreben.

Rohdatei:

```

15, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 47, [20-Atrium,Barrier,Door,15-Bedroom2]
19, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 49, [20-Atrium,Barrier,Door,14-Bedroom3]
30, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 42, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,20-Atrium]
2, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 48, [14-Bedroom3,Barrier,Door,20-Atrium]
11, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 49, [20-Atrium,Barrier,Door,14-Bedroom3]
35, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 54, [20-Atrium,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
34, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 48, [14-Bedroom3,Barrier,Door,20-Atrium]
0, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 44, [1-LivingRoom,Barrier-free,Door,20-Atrium]
22, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 46, [15-Bedroom2,Barrier,Door,20-Atrium]
36, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 53, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,20-Atrium]
26, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 53, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,20-Atrium]
21, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 47, [20-Atrium,Barrier,Door,15-Bedroom2]
4, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 46, [15-Bedroom2,Barrier,Door,20-Atrium]
18, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 42, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,20-Atrium]
Nr, Usecase, Act.-Type, Role, Use-Or., Use, Specification1, Specification2
25, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 54, [20-Atrium,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
16, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 46, [15-Bedroom2,Barrier,Door,20-Atrium]
23, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 47, [20-Atrium,Barrier,Door,15-Bedroom2]
12, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 48, [14-Bedroom3,Barrier,Door,20-Atrium]
5, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 47, [20-Atrium,Barrier,Door,15-Bedroom2]
31, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 47, [20-Atrium,Barrier,Door,15-Bedroom2]
14, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 42, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,20-Atrium]
17, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 43, [20-Atrium,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
32, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 46, [15-Bedroom2,Barrier,Door,20-Atrium]
27, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 43, [20-Atrium,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
24, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 46, [15-Bedroom2,Barrier,Door,20-Atrium]
29, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 43, [20-Atrium,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
1, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 49, [20-Atrium,Barrier,Door,14-Bedroom3]
7, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 49, [20-Atrium,Barrier,Door,14-Bedroom3]
3, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 47, [20-Atrium,Barrier,Door,15-Bedroom2]
28, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 42, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,20-Atrium]
13, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 43, [20-Atrium,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
8, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 48, [14-Bedroom3,Barrier,Door,20-Atrium]
33, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 49, [20-Atrium,Barrier,Door,14-Bedroom3]
6, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 46, [15-Bedroom2,Barrier,Door,20-Atrium]
10, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 46, [15-Bedroom2,Barrier,Door,20-Atrium]
9, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 47, [20-Atrium,Barrier,Door,15-Bedroom2]
20, 1, 5, Dweller, 0, Transition: 48, [14-Bedroom3,Barrier,Door,20-Atrium]

```

Aufbereitete Datei:

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Nr	Usecase	Act-Type	Role	Use-Or.	Use	Specification1	Specification2
2	0	1	5	Dweller	0	Transition: 44		[1-LivingRoom,Barrier-free,Door,20-Atrium]
3	1	1	5	Dweller	0	Transition: 49		[20-Atrium,Barrier,Door,14-Bedroom3]
4	2	1	5	Dweller	0	Transition: 48		[14-Bedroom3,Barrier,Door,20-Atrium]
5	3	1	5	Dweller	0	Transition: 47		[20-Atrium,Barrier,Door,15-Bedroom2]
6	4	1	5	Dweller	0	Transition: 46		[15-Bedroom2,Barrier,Door,20-Atrium]
7	5	1	5	Dweller	0	Transition: 47		[20-Atrium,Barrier,Door,15-Bedroom2]
8	6	1	5	Dweller	0	Transition: 46		[15-Bedroom2,Barrier,Door,20-Atrium]
9	7	1	5	Dweller	0	Transition: 49		[20-Atrium,Barrier,Door,14-Bedroom3]
10	8	1	5	Dweller	0	Transition: 48		[14-Bedroom3,Barrier,Door,20-Atrium]
11	9	1	5	Dweller	0	Transition: 47		[20-Atrium,Barrier,Door,15-Bedroom2]
12	10	1	5	Dweller	0	Transition: 46		[15-Bedroom2,Barrier,Door,20-Atrium]
13	11	1	5	Dweller	0	Transition: 49		[20-Atrium,Barrier,Door,14-Bedroom3]
14	12	1	5	Dweller	0	Transition: 48		[14-Bedroom3,Barrier,Door,20-Atrium]
15	13	1	5	Dweller	0	Transition: 43		[20-Atrium,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
16	14	1	5	Dweller	0	Transition: 42		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,20-Atrium]
17	15	1	5	Dweller	0	Transition: 47		[20-Atrium,Barrier,Door,15-Bedroom2]
18	16	1	5	Dweller	0	Transition: 46		[15-Bedroom2,Barrier,Door,20-Atrium]
19	17	1	5	Dweller	0	Transition: 43		[20-Atrium,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
20	18	1	5	Dweller	0	Transition: 42		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,20-Atrium]
21	19	1	5	Dweller	0	Transition: 49		[20-Atrium,Barrier,Door,14-Bedroom3]
22	20	1	5	Dweller	0	Transition: 48		[14-Bedroom3,Barrier,Door,20-Atrium]
23	21	1	5	Dweller	0	Transition: 47		[20-Atrium,Barrier,Door,15-Bedroom2]
24	22	1	5	Dweller	0	Transition: 46		[15-Bedroom2,Barrier,Door,20-Atrium]
25	23	1	5	Dweller	0	Transition: 47		[20-Atrium,Barrier,Door,15-Bedroom2]
26	24	1	5	Dweller	0	Transition: 46		[15-Bedroom2,Barrier,Door,20-Atrium]
27	25	1	5	Dweller	0	Transition: 54		[20-Atrium,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
28	26	1	5	Dweller	0	Transition: 53		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,20-Atrium]
29	27	1	5	Dweller	0	Transition: 43		[20-Atrium,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
30	28	1	5	Dweller	0	Transition: 42		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,20-Atrium]
31	29	1	5	Dweller	0	Transition: 43		[20-Atrium,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
32	30	1	5	Dweller	0	Transition: 42		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,20-Atrium]
33	31	1	5	Dweller	0	Transition: 47		[20-Atrium,Barrier,Door,15-Bedroom2]
34	32	1	5	Dweller	0	Transition: 46		[15-Bedroom2,Barrier,Door,20-Atrium]
35	33	1	5	Dweller	0	Transition: 49		[20-Atrium,Barrier,Door,14-Bedroom3]
36	34	1	5	Dweller	0	Transition: 48		[14-Bedroom3,Barrier,Door,20-Atrium]
37	35	1	5	Dweller	0	Transition: 54		[20-Atrium,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
38	36	1	5	Dweller	0	Transition: 53		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,20-Atrium]

Abbildung 61: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Gegenwart 5, Simulationsergebnis

Die beispielhaften Nutzungsfälle 1 bis 5 sind auf die gegenwärtige Nutzung bezogen. Interessant ist aber auch die Betrachtung einer späteren Umnutzung, die — soweit absehbar — spezifiziert und im Entwurf berücksichtigt werden sollte, um spätere Umbaumaßnahmen abschätzen und planen zu können. Idealerweise kann die Gebäudetopologie so gestaltet werden, dass die Anforderungen dieser antizipierten Nutzungsfälle erfüllbar sind oder der Aufwand späterer Umbaumaßnahmen minimiert wird. Die vorgestellte Methode unterstützt das Vorgehen hierzu durch die Eignungsprüfung für die Nutzungsfälle (C) und ihre Vorbereitung (E).⁹²

Im Beispiel seien folgende Nutzungsfälle 7 und 8 gegeben:⁹³

7. Im Falle einer Pflegebedürftigkeit wünscht sich der Bauherr die Möglichkeit, daheim unterstützt zu werden, im Bedarfsfall auch durch eine Pflegekraft, die tageweise im Haus mit wohnt. Als Wohnbereich könnte das Gästezimmer dienen, wobei dann durch möglichst geringe Umbaumaßnahmen eine Erschließung über einen separaten Eingang erreicht werden soll.
8. Der Bauherr hat ein Kind, welches aufgrund seiner Disposition möglicherweise auch als junger Erwachsener länger als andere im Elternhaus wohnen bleiben müsste. Dazu soll ein gewisser separierter Wohnbereich geschaffen werden, der aus Wohnzimmer, Schlafzimmer und eigenem Bad besteht. Der Zugang zu diesem Bereich kann über den gemeinsamen Eingang oder durch Schaffung eines Nebeneingangs erschlossen werden. Alle Umbaumaßnahmen sollen sich auf Durchbrüche oder Türinstallationen beschränken.

Die Diagramme in den Abbildungen 62 und 65 beschreiben als Nutzungstopologie-Netze die Nutzungsanforderungen.

Im Nutzungsfall 7, der das Gästezimmer und damit die im Nutzungsfall 3 beschriebene Nutzungsanforderung aufgreift, d. h. die direkte Zugänglichkeit eines Bades, wird die unklare Topologie der Räume durch Spezifikation eines „Raum“s ausgedrückt. Dieser erlaubt als Platzhalter eine variable Anordnung von Bad und Gästezimmer nach dem Übergang aus dem Eingangsbereich. Der Eingangsbereich muss die Funktion einer Garderobe anbieten. Gästezimmer und Bad müssen lediglich als solche bezeichnet sein, wobei auch hier Funktionsanforderungen als Prüfmittel der Nutzungsanforderung dienen könnten. Die Anforderung des Nutzungsfall 7 führen zur Ergänzung der aus den Nutzungsfällen 2 und 3 gewonnenen Gebäudetopologie um einen Raumübergang zwischen dem für die gegenwärtige Nutzung bestimmten Gartenwirtschaftsraum und dem Bad des Gästezimmers. Die Abbildung 63 zeigt das Diagramm des Ausschnitts der Gebäudetopologie. Die Simulation für die Prüfung zeigt die Eignung dieses Ausschnittes für die Nutzungsanforderung der Nutzungsfalls 7. Im Ergebnis ist die Anforderung im Entwurf für die gegenwärtige Nutzung einzuplanen. Zu entscheiden bleibt, ob eine Tür jetzt schon einzubauen ist oder später ein Durchbruch erfolgen soll.

⁹² Vergleiche Beschreibung des Vorgehens im Fall des Entwurfs im Rahmen eines Umbaus in 5.3.3 und Abbildung 46.

⁹³ Nachfolgend wird noch ein komplexer Nutzungsfall der gegenwärtigen Nutzung mit Nr. 6 behandelt.

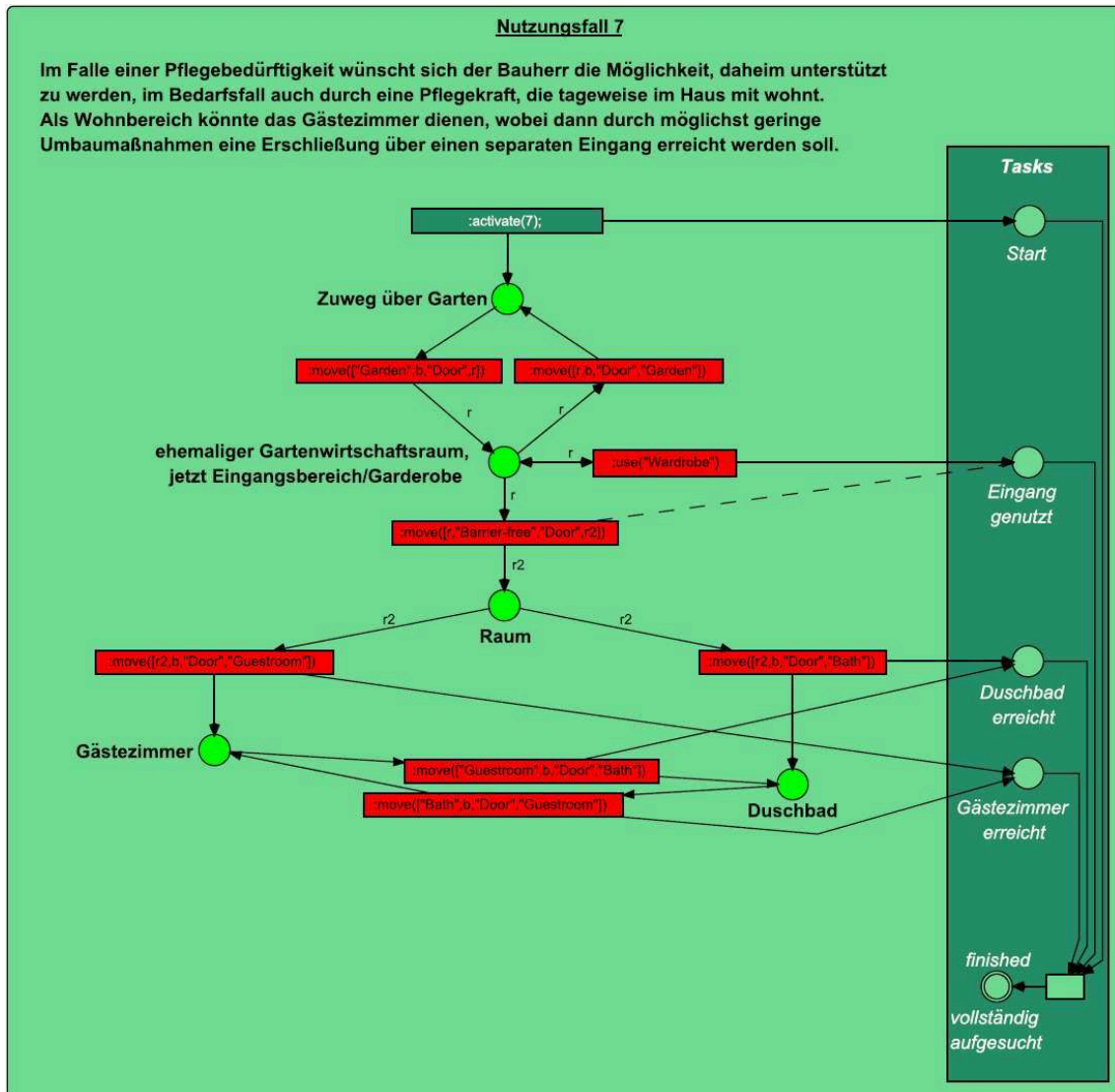


Abbildung 62: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Zukunft 7

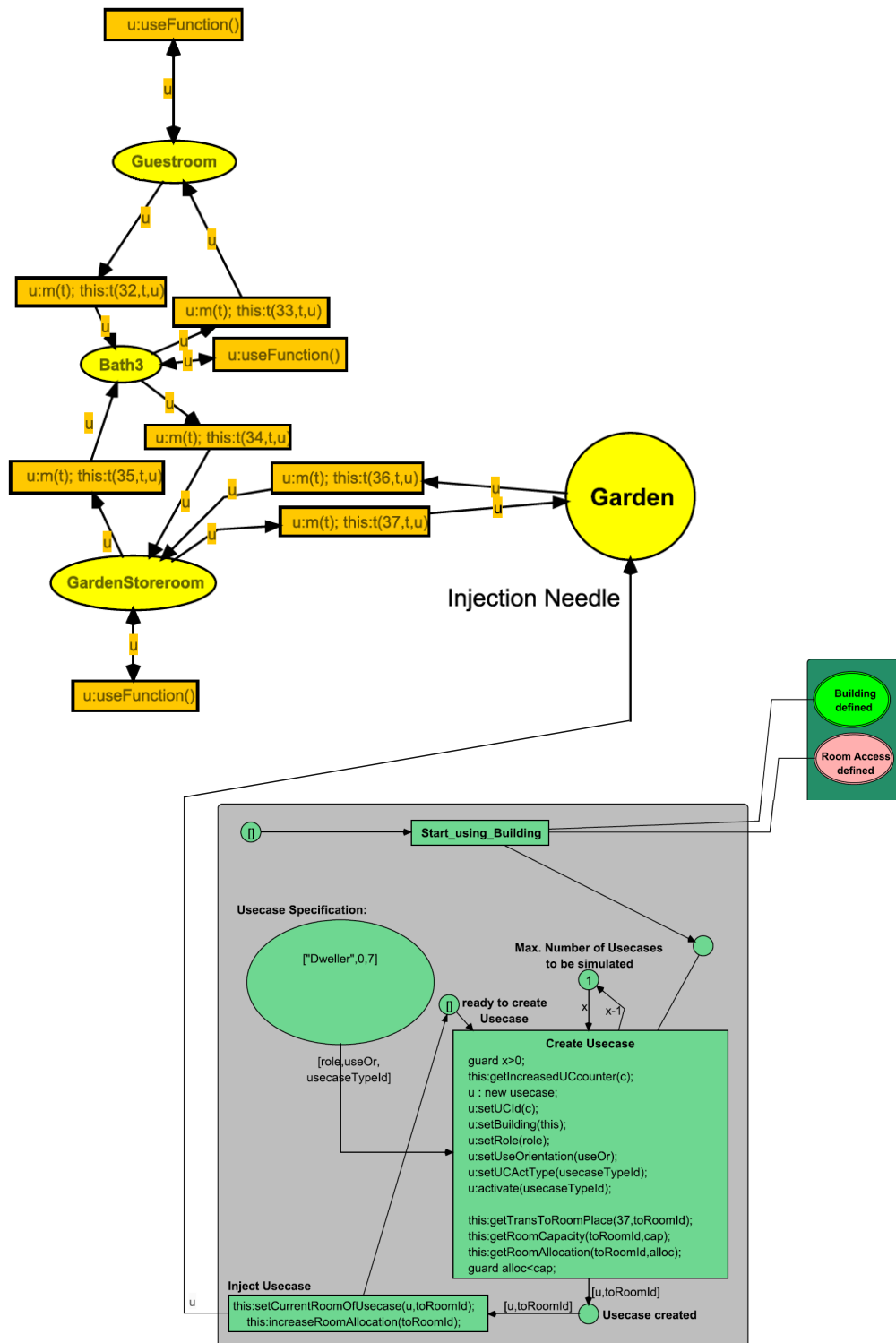


Abbildung 63: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Ausschnitt Zukunft 7

Rohdatei:

```

Nr, Usecase, Act.-Type, Role, Use-Or., Use, Specification1, Specification2
8, 1, 7, Dweller, 0, Transition: 35, [4-GardenStoreroom,Barrier-free,Door,3-Bath3]
0, 1, 7, Dweller, 0, Transition: 36, [21-Garden,Barrier,Door,4-GardenStoreroom]
3, 1, 7, Dweller, 0, Function: Wardrobe
5, 1, 7, Dweller, 0, Function: Wardrobe
10, 1, 7, Dweller, 0, Transition: 32, [2-Guestroom,Barrier-free,Door,3-Bath3]
6, 1, 7, Dweller, 0, Function: Wardrobe
7, 1, 7, Dweller, 0, Function: Wardrobe
1, 1, 7, Dweller, 0, Function: Wardrobe
9, 1, 7, Dweller, 0, Transition: 33, [3-Bath3,Barrier-free,Door,2-Guestroom]
2, 1, 7, Dweller, 0, Function: Wardrobe
4, 1, 7, Dweller, 0, Function: Wardrobe

```

Aufbereitete Datei:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Nr	Usecase	Act.-Type	Role	Use-Or.	Use	Specification1	Specification2
2	0	1	7	Dweller	0	Transition: 36		[21-Garden,Barrier,Door,4-GardenStoreroom]
3	1	1	7	Dweller	0	Function: Wardrobe		
4	2	1	7	Dweller	0	Function: Wardrobe		
5	3	1	7	Dweller	0	Function: Wardrobe		
6	4	1	7	Dweller	0	Function: Wardrobe		
7	5	1	7	Dweller	0	Function: Wardrobe		
8	6	1	7	Dweller	0	Function: Wardrobe		
9	7	1	7	Dweller	0	Function: Wardrobe		
10	8	1	7	Dweller	0	Transition: 35		[4-GardenStoreroom,Barrier-free,Door,3-Bath3]
11	9	1	7	Dweller	0	Transition: 33		[3-Bath3,Barrier-free,Door,2-Guestroom]
12	10	1	7	Dweller	0	Transition: 32		[2-Guestroom,Barrier-free,Door,3-Bath3]

Abbildung 64: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Zukunft 7, Simulationsergebnis

Für den Entwurf eines Topologie-Netzes für den Nutzungsfall 8 kann auf das Raumprogramm zurückgegriffen werden. Hier sind zwei Kinderzimmer und evtl. ein Bad für die Kinder vorgesehen. Das Nutzungstopologie-Netz beschreibt einen Zusammenhang von zwei Schlafräumen und einem Bad, die alle über einen Flur erschlossen werden. Letzterer soll über einen Eingangsbereich direkt erreicht werden. Dabei ist es offen, ob der Eingangsbereich einen separaten Hauseingang hat. Es wird auch die Unklarheit spezifiziert, ob ein Zugang aus dem Eingangsbereich direkt ins Wohnzimmer erfolgt. Abbildung 66 zeigt ein Diagramm mit dem Ausschnitt der vorgeschlagenen Gebäudetopologie, die diese zukünftige Nutzung unterstützen kann, wie das Simulationsergebnis in Abbildung 67 zeigt. Für den Entwurf heißt dies, dass ein zweites Bad vorzusehen ist, welches über einen separaten Flur ebenso wie die zwei Kinderzimmer erschlossen wird, wobei der Flur direkt zum Eingangsbereich des Hauses führen sollte. Die Option, einen separaten Eingangsbereich zu schaffen, kann zusätzlich verfolgt werden.

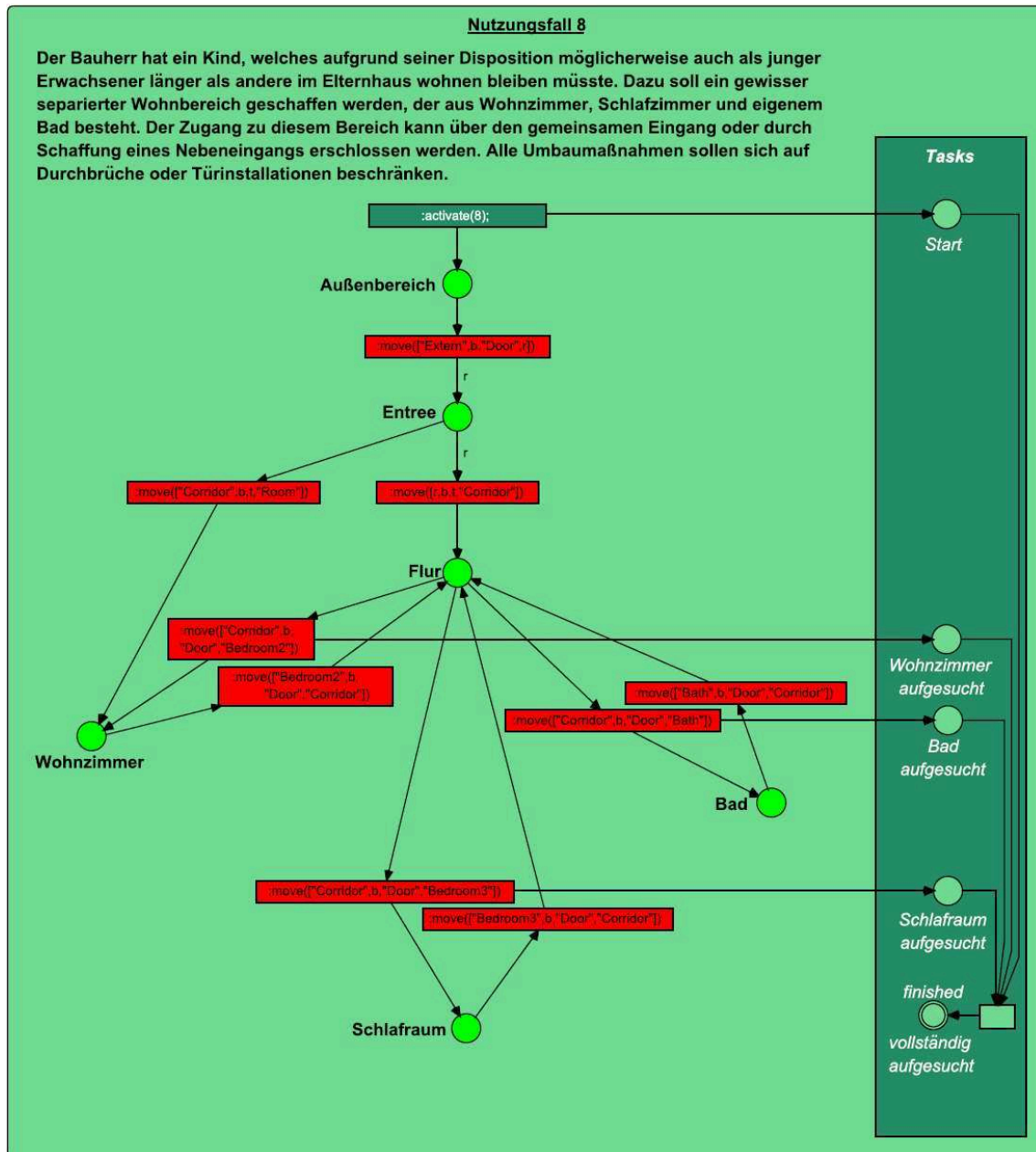


Abbildung 65: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Zukunft 8

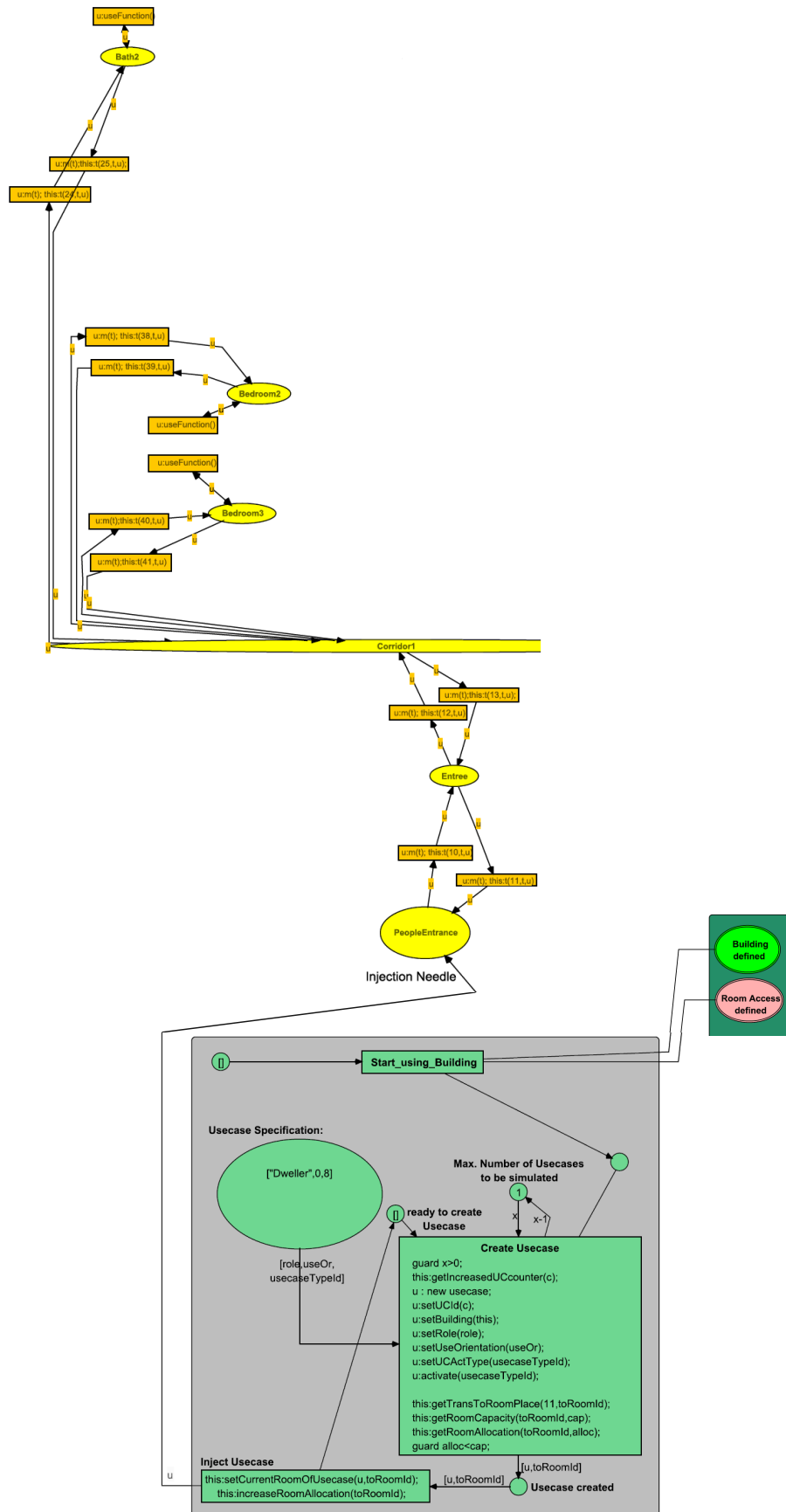


Abbildung 66: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Ausschnitt Zukunft 8

Rohdatei:

```

5, 1, 8, Dweller, 0, Transition: 25, [16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
10, 1, 8, Dweller, 0, Transition: 24, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
12, 1, 8, Dweller, 0, Transition: 24, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
4, 1, 8, Dweller, 0, Transition: 24, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
1, 1, 8, Dweller, 0, Transition: 12, [10-Entree,Barrier-free,Hall,9-Corridor1]
7, 1, 8, Dweller, 0, Transition: 41, [14-Bedroom3,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
2, 1, 8, Dweller, 0, Transition: 24, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
Nr, Usecase, Act.-Type, Role, Use-Or., Use, Specification1, Specification2
11, 1, 8, Dweller, 0, Transition: 25, [16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
3, 1, 8, Dweller, 0, Transition: 25, [16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
6, 1, 8, Dweller, 0, Transition: 40, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,14-Bedroom3]
13, 1, 8, Dweller, 0, Transition: 25, [16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
0, 1, 8, Dweller, 0, Transition: 10, [13-External,Barrier-free,Door,10-Entree]
8, 1, 8, Dweller, 0, Transition: 24, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
14, 1, 8, Dweller, 0, Transition: 38, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,15-Bedroom2]
9, 1, 8, Dweller, 0, Transition: 25, [16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]

```

Aufbereitete Datei:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Nr	Usecase	Act.-Type	Role	Use-Or.	Use	Specification1	Specification2
2	0	1	8	Dweller	0	Transition: 10		[13-External,Barrier-free,Door,10-Entree]
3	1	1	8	Dweller	0	Transition: 12		[10-Entree,Barrier-free,Hall,9-Corridor1]
4	2	1	8	Dweller	0	Transition: 24		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
5	3	1	8	Dweller	0	Transition: 25		[16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
6	4	1	8	Dweller	0	Transition: 24		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
7	5	1	8	Dweller	0	Transition: 25		[16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
8	6	1	8	Dweller	0	Transition: 40		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,14-Bedroom3]
9	7	1	8	Dweller	0	Transition: 41		[14-Bedroom3,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
10	8	1	8	Dweller	0	Transition: 24		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
11	9	1	8	Dweller	0	Transition: 25		[16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
12	10	1	8	Dweller	0	Transition: 24		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
13	11	1	8	Dweller	0	Transition: 25		[16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
14	12	1	8	Dweller	0	Transition: 24		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
15	13	1	8	Dweller	0	Transition: 25		[16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
16	14	1	8	Dweller	0	Transition: 38		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,15-Bedroom2]

Abbildung 67: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall Zukunft 8, Simulationsergebnis

Die Verwendung des methodischen Vorgehens im Individualentwurf (A) hat in diesem Beispiel durch Anwendung von Basismethoden des Architekturentwurfs, insbesondere Designfokus (10)/(11) für die detaillierte Herleitung der formalen Nutzungstopologie-Netze, Bottom-Up (7) für die Bildung von Gebäudetopologie-Ausschnitten, Top-Down (5)/(6) für die Einordnung in ein Raumprogramm sowie Simulation (3)/(4) für die Eignungsprüfung (C)/(D), zur Bildung von Ausschnitten der Gebäudetopologie geführt, die im weiteren Entwurf Voraussetzungen für die Zusammensetzung zu einer gesamten Gebäudetopologie sind. Die Zusammensetzung kann der Entwerfer durch Zusammenfügen der gebildeten Raum-Stellen erreichen. Fehlende Vorgaben erfordern Rückgriff auf Erfahrung und kreative Schließung dieser Lücken. Weitere umfassendere Nutzungsfälle können diesen Prozess begleiten, wodurch eine iterativ-inkrementelle Annäherung an die Gebäudetopologie erreicht wird, die alle Anforderungen der Nutzungsfälle erfüllt. In diesem Beispiel ist eine Gebäudetopologie entworfen worden. Das Diagramm in Abbildung 68 zeigt das zugehörige Topologie-Netz, und in den Abbildungen 69 und 70 wird das Diagramm des Spezifikationsnetzes dargestellt.

Ein umfangreicher Nutzungsfall „Morgens 61-62-63“ aus dem Alltag der gegenwärtigen Nutzung soll auf die Erfüllung der gestellten Nutzungsanforderungen in diesem Beispiel abschließend geprüft werden. Hierzu wird die Gebäudenutzung für drei Nutzungsfalltypen 61, 62 und 63, welche drei Rollen und unterschiedliche Nutzungsanforderungen beschreiben, simuliert. Der Nutzungsfall beschreibt einzelne und gemeinsame Nutzungsanforderungen. Die gesamte Gebäudetopologie wird durch Simulation auf Erfüllung der Anforderungen geprüft. Die Nutzungsfallnetze werden, wie in Abbildung 68 dargestellt, in das Topologie-Netz eingebracht. Die Nutzungsfalltypen sind in den Abbildungen 71, 73 und 75 spezifiziert. Die Protokolle der Simulationsergebnisse sind in den Abbildungen 72, 74 und 76 dargestellt.

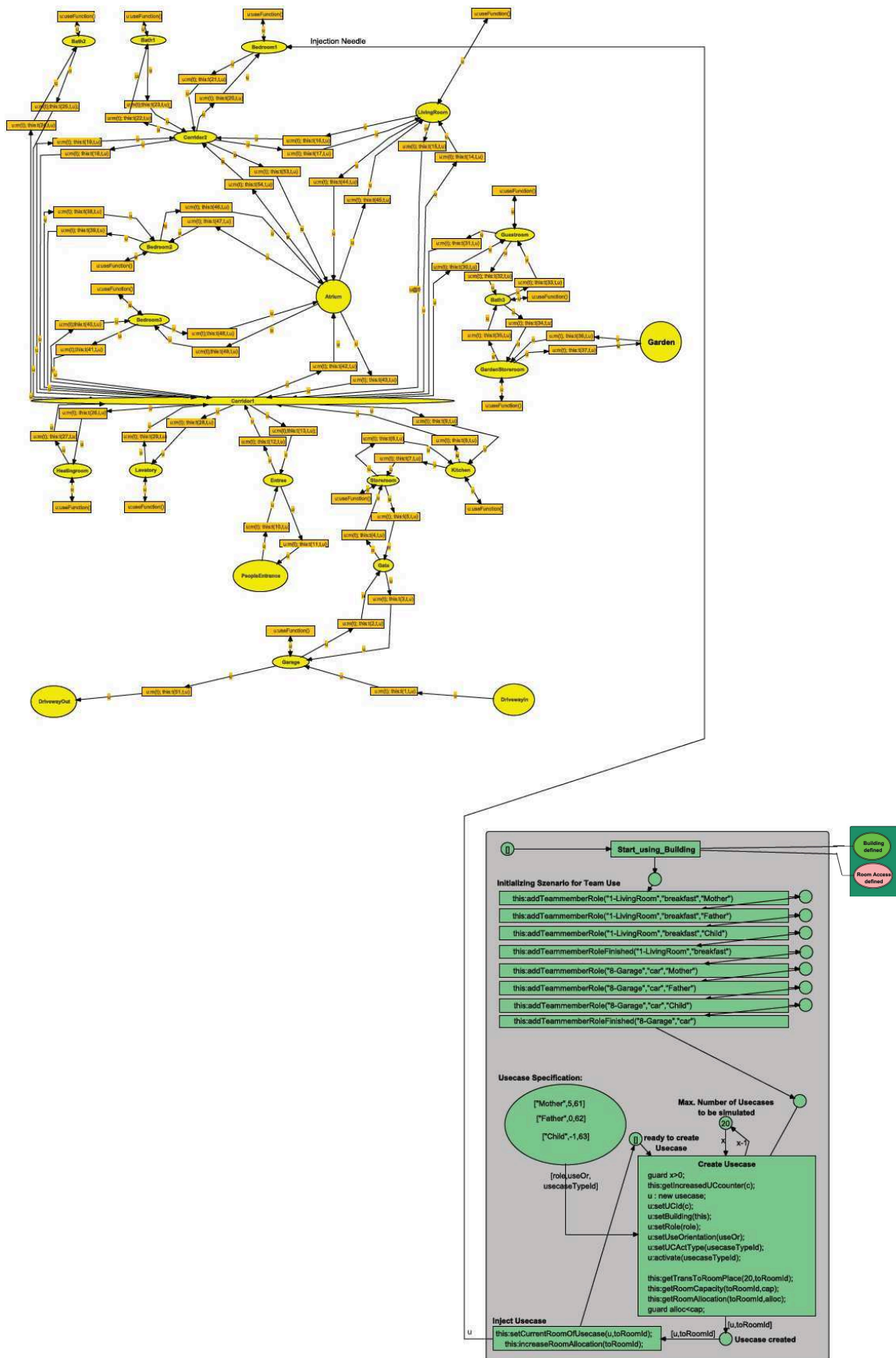
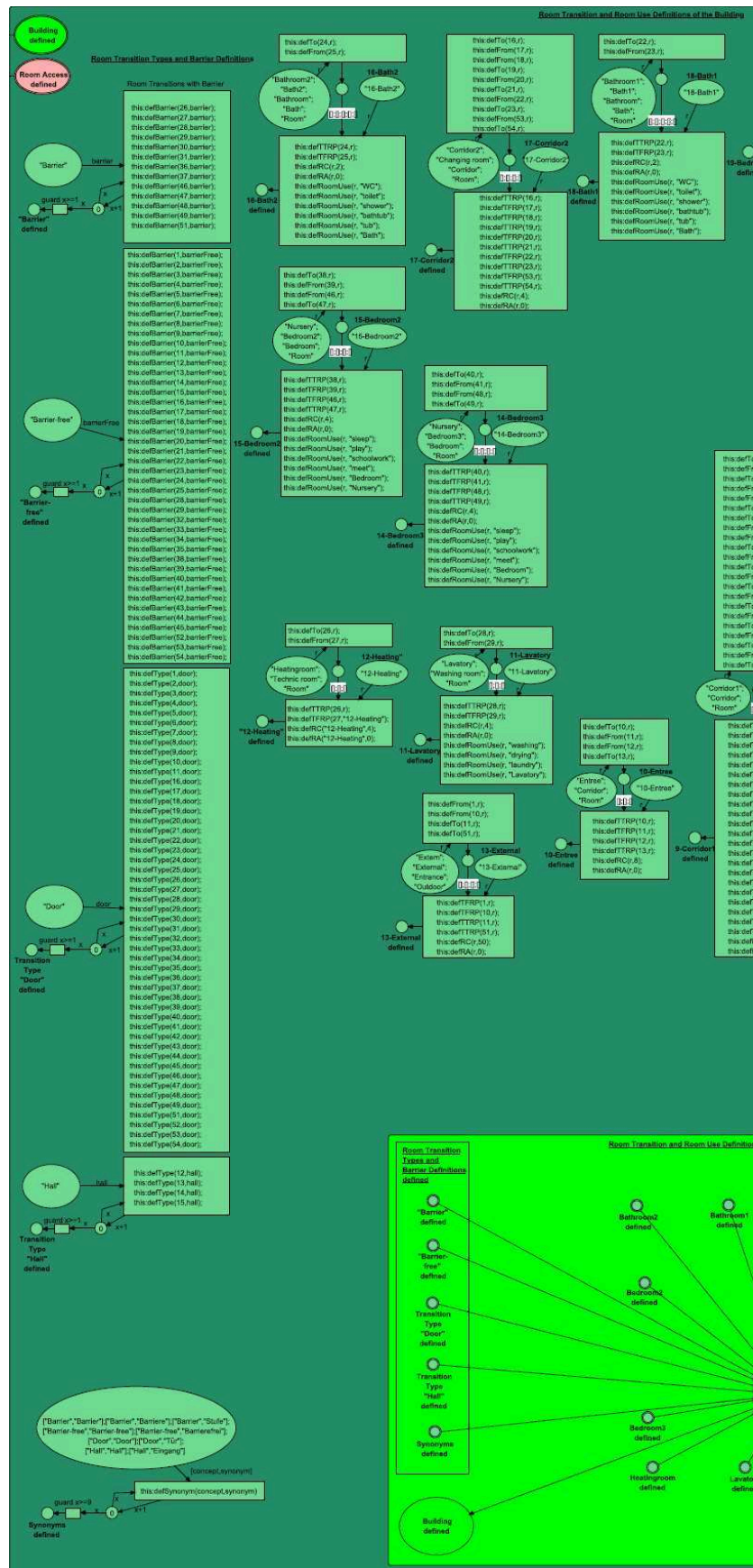


Abbildung 68: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Nutzung "Morgens 61-62-63"



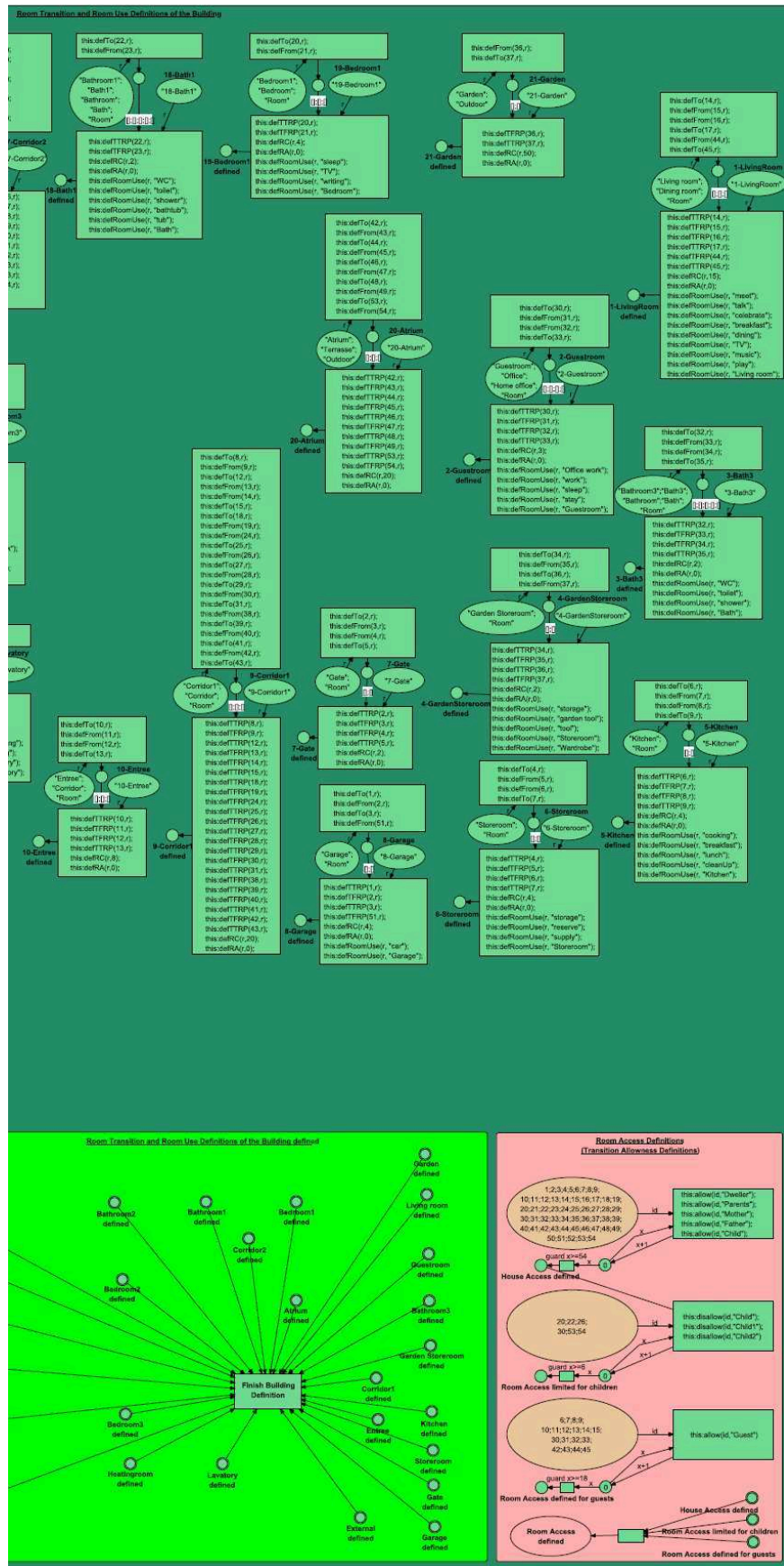


Abbildung 70: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell, Spezifikationsnetz, Teil 2

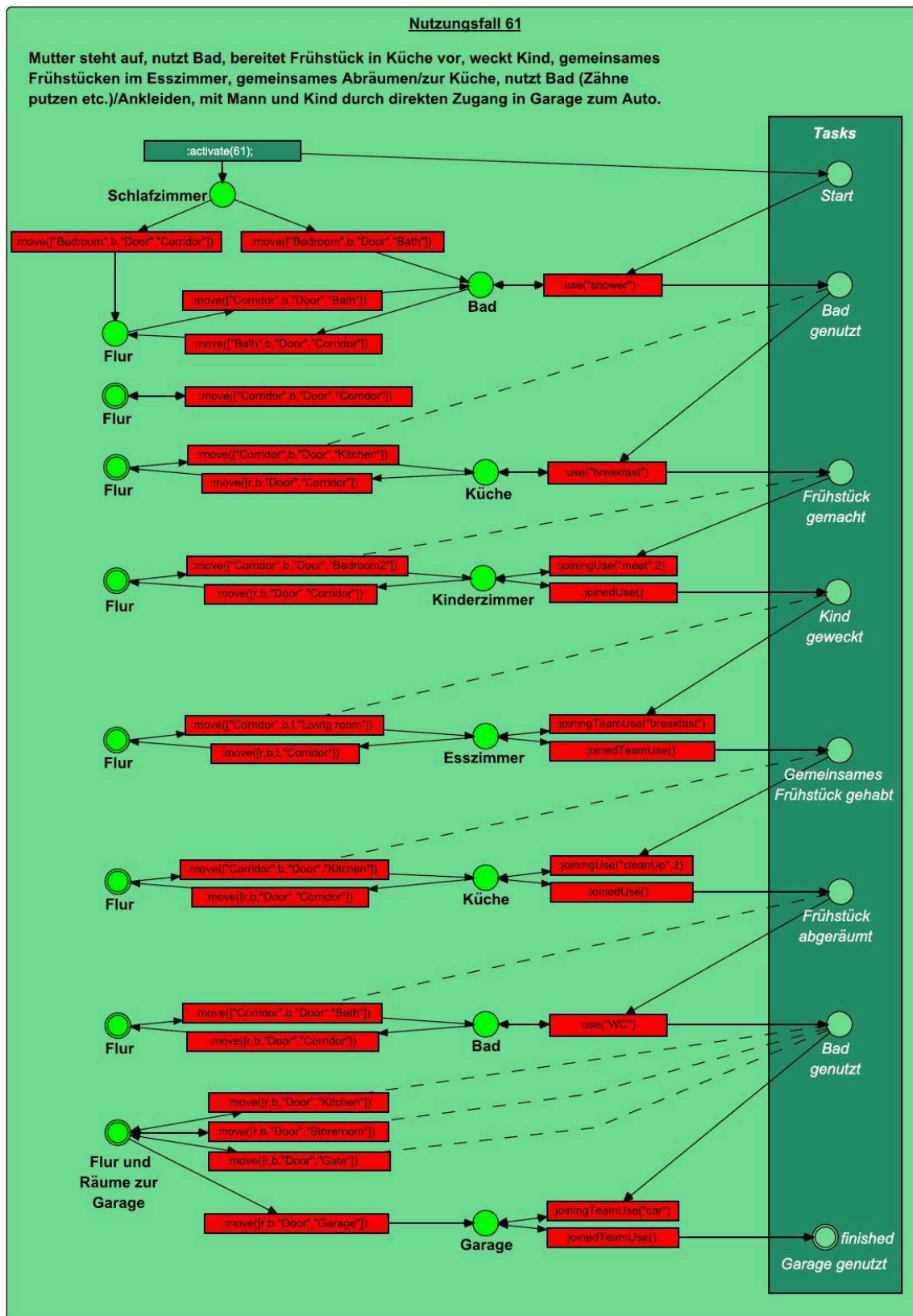


Abbildung 71: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall "Morgens 61"

Rohdatei:

```

21, 1, 61, Mother, 5, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
2, 1, 61, Mother, 5, Function: shower
10, 1, 61, Mother, 5, Transition: 24, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
25, 1, 61, Mother, 5, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
18, 1, 61, Mother, 5, Transition: 9, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
11, 1, 61, Mother, 5, Transition: 25, [16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
1, 1, 61, Mother, 5, Transition: 22, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
20, 1, 61, Mother, 5, Transition: 8, [5-Kitchen,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
0, 1, 61, Mother, 5, Transition: 21, [19-Bedroom1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
5, 1, 61, Mother, 5, Transition: 9, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
26, 1, 61, Mother, 5, Transition: 9, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
4, 1, 61, Mother, 5, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
19, 1, 61, Mother, 5, Function: cleanUp
9, 1, 61, Mother, 5, Transition: 25, [16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
Nr, Usecase, Act.-Type, Role, Use-Or., Use, Specification1, Specification2
27, 1, 61, Mother, 5, Transition: 7, [5-Kitchen,Barrier-free,Door,6-Storeroom]
22, 1, 61, Mother, 5, Transition: 22, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
24, 1, 61, Mother, 5, Transition: 23, [18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
13, 1, 61, Mother, 5, Function: meet
8, 1, 61, Mother, 5, Transition: 24, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
17, 1, 61, Mother, 5, Transition: 15, [1-LivingRoom,Barrier-free,Hall,9-Corridor1]
12, 1, 61, Mother, 5, Transition: 38, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,15-Bedroom2]
7, 1, 61, Mother, 5, Transition: 8, [5-Kitchen,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
15, 1, 61, Mother, 5, Transition: 14, [9-Corridor1,Barrier-free,Hall,1-LivingRoom]
28, 1, 61, Mother, 5, Transition: 5, [6-Storeroom,Barrier-free,Door,7-Gate]
23, 1, 61, Mother, 5, Function: WC
3, 1, 61, Mother, 5, Transition: 23, [18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
16, 1, 61, Mother, 5, Function: breakfast
14, 1, 61, Mother, 5, Transition: 39, [15-Bedroom2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
6, 1, 61, Mother, 5, Function: breakfast
30, 1, 61, Mother, 5, Function: car
29, 1, 61, Mother, 5, Transition: 3, [7-Gate,Barrier-free,Door,8-Garage]

```

Aufbereitete Datei:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Nr	Usecase	Act.-Type	Role	Use-Or.	Use	Specification1	Specification2
2	0	1	61	Mother	5	Transition: 21		[19-Bedroom1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
3	1	1	61	Mother	5	Transition: 22		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
4	2	1	61	Mother	5	Function: shower		
5	3	1	61	Mother	5	Transition: 23		[18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
6	4	1	61	Mother	5	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
7	5	1	61	Mother	5	Transition: 9		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
8	6	1	61	Mother	5	Function: breakfast		
9	7	1	61	Mother	5	Transition: 8		[5-Kitchen,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
10	8	1	61	Mother	5	Transition: 24		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
11	9	1	61	Mother	5	Transition: 25		[16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
12	10	1	61	Mother	5	Transition: 24		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
13	11	1	61	Mother	5	Transition: 25		[16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
14	12	1	61	Mother	5	Transition: 38		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,15-Bedroom2]
15	13	1	61	Mother	5	Function: meet		
16	14	1	61	Mother	5	Transition: 39		[15-Bedroom2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
17	15	1	61	Mother	5	Transition: 14		[9-Corridor1,Barrier-free,Hall,1-LivingRoom]
18	16	1	61	Mother	5	Function: breakfast		
19	17	1	61	Mother	5	Transition: 15		[1-LivingRoom,Barrier-free,Hall,9-Corridor1]
20	18	1	61	Mother	5	Transition: 9		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
21	19	1	61	Mother	5	Function: cleanUp		
22	20	1	61	Mother	5	Transition: 8		[5-Kitchen,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
23	21	1	61	Mother	5	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
24	22	1	61	Mother	5	Transition: 22		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
25	23	1	61	Mother	5	Function: WC		
26	24	1	61	Mother	5	Transition: 23		[18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
27	25	1	61	Mother	5	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
28	26	1	61	Mother	5	Transition: 9		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
29	27	1	61	Mother	5	Transition: 7		[5-Kitchen,Barrier-free,Door,6-Storeroom]
30	28	1	61	Mother	5	Transition: 5		[6-Storeroom,Barrier-free,Door,7-Gate]
31	29	1	61	Mother	5	Transition: 3		[7-Gate,Barrier-free,Door,8-Garage]
32	30	1	61	Mother	5	Function: car		

Abbildung 72: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall "Morgens 61", Simulationsergebnis

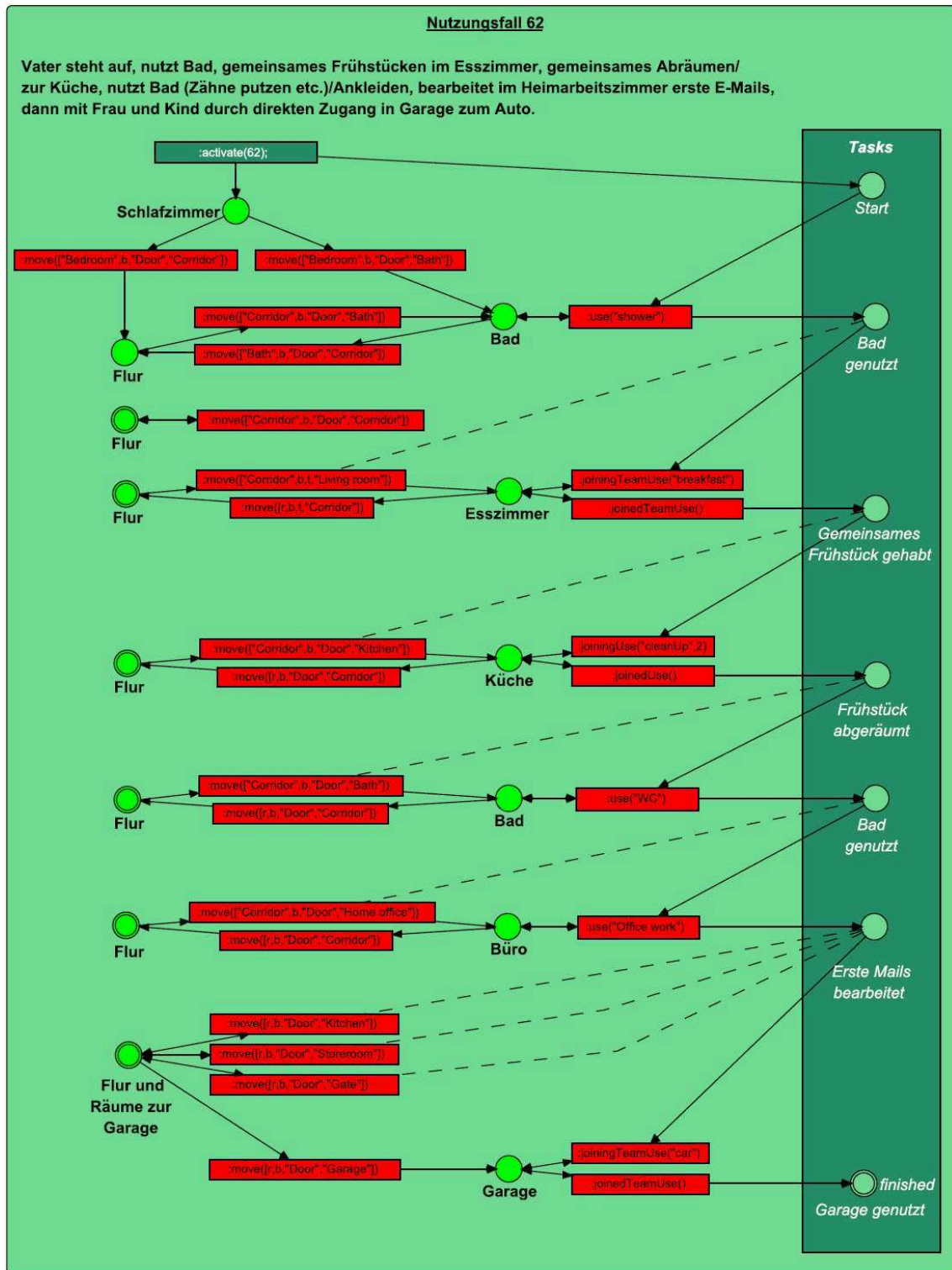


Abbildung 73: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall "Morgens 62"

Rohdatei:

28, 3, 62, Father, 0, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 5, 3, 62, Father, 0, Transition: 23, [18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 54, 3, 62, Father, 0, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 3, 3, 62, Father, 0, Transition: 23, [18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 26, 3, 62, Father, 0, Transition: 25, [16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 9, 3, 62, Father, 0, Function: breakfast
 51, 3, 62, Father, 0, Transition: 25, [16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 29, 3, 62, Father, 0, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 18, 3, 62, Father, 0, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 70, 3, 62, Father, 0, Transition: 7, [5-Kitchen,Barrier-free,Door,6-Storeroom]
 73, 3, 62, Father, 0, Function: car
 16, 3, 62, Father, 0, Transition: 23, [18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 34, 3, 62, Father, 0, Transition: 22, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
 36, 3, 62, Father, 0, Transition: 22, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
 8, 3, 62, Father, 0, Transition: 17, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,1-LivingRoom]
 12, 3, 62, Father, 0, Transition: 23, [18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 41, 3, 62, Father, 0, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 44, 3, 62, Father, 0, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 65, 3, 62, Father, 0, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 13, 3, 62, Father, 0, Transition: 22, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
 23, 3, 62, Father, 0, Function: cleanUp
 39, 3, 62, Father, 0, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 66, 3, 62, Father, 0, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 43, 3, 62, Father, 0, Transition: 23, [18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 1, 3, 62, Father, 0, Transition: 22, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
 52, 3, 62, Father, 0, Transition: 30, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,2-Guestroom]
 6, 3, 62, Father, 0, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 50, 3, 62, Father, 0, Function: WC
 69, 3, 62, Father, 0, Transition: 6, [6-Storeroom,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
 55, 3, 62, Father, 0, Transition: 22, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
 49, 3, 62, Father, 0, Transition: 24, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
 60, 3, 62, Father, 0, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 37, 3, 62, Father, 0, Transition: 23, [18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 33, 3, 62, Father, 0, Transition: 23, [18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 68, 3, 62, Father, 0, Transition: 7, [5-Kitchen,Barrier-free,Door,6-Storeroom]
 7, 3, 62, Father, 0, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 63, 3, 62, Father, 0, Function: Office work
 25, 3, 62, Father, 0, Transition: 24, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
 62, 3, 62, Father, 0, Transition: 30, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,2-Guestroom]
 19, 3, 62, Father, 0, Transition: 22, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
 46, 3, 62, Father, 0, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 32, 3, 62, Father, 0, Transition: 22, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 35, 3, 62, Father, 0, Transition: 23, [18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 53, 3, 62, Father, 0, Transition: 31, [2-Guestroom,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 17, 3, 62, Father, 0, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 0, 3, 62, Father, 0, Transition: 21, [19-Bedroom1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 42, 3, 62, Father, 0, Transition: 22, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
 20, 3, 62, Father, 0, Transition: 23, [18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 38, 3, 62, Father, 0, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 11, 3, 62, Father, 0, Transition: 22, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
 24, 3, 62, Father, 0, Transition: 8, [5-Kitchen,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 Nr, UseCase, Act.-Type, Role, Use-Or., Use, Specification1, Specification2
 45, 3, 62, Father, 0, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 57, 3, 62, Father, 0, Transition: 22, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
 67, 3, 62, Father, 0, Transition: 9, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
 47, 3, 62, Father, 0, Transition: 24, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
 71, 3, 62, Father, 0, Transition: 5, [6-Storeroom,Barrier-free,Door,7-Gate]
 27, 3, 62, Father, 0, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 30, 3, 62, Father, 0, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 2, 3, 62, Father, 0, Function: shower
 40, 3, 62, Father, 0, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 31, 3, 62, Father, 0, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 59, 3, 62, Father, 0, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 61, 3, 62, Father, 0, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 14, 3, 62, Father, 0, Transition: 23, [18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 56, 3, 62, Father, 0, Transition: 23, [18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 64, 3, 62, Father, 0, Transition: 31, [2-Guestroom,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 58, 3, 62, Father, 0, Transition: 23, [18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
 22, 3, 62, Father, 0, Transition: 9, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
 72, 3, 62, Father, 0, Transition: 3, [7-Gate,Barrier-free,Door,8-Garage]
 15, 3, 62, Father, 0, Transition: 22, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
 48, 3, 62, Father, 0, Transition: 25, [16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 4, 3, 62, Father, 0, Transition: 22, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
 21, 3, 62, Father, 0, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
 10, 3, 62, Father, 0, Transition: 16, [1-LivingRoom,Barrier-free,Door,17-Corridor2]

Aufbereitete Datei:

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Nr	UseCase	Act.-Type	Role	Use-Or	Use	Specification1	Specification2
1	0	3	62	Father	0	Transition: 21		[19-Bedroom1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
2	1	3	62	Father	0	Transition: 22		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
3	2	3	62	Father	0	Function: shower		
4	3	3	62	Father	0	Transition: 23		[18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
5	4	3	62	Father	0	Transition: 22		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
6	5	3	62	Father	0	Transition: 23		[18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
7	6	3	62	Father	0	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
8	7	3	62	Father	0	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
9	8	3	62	Father	0	Transition: 17		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,1-LivingRoom]
10	9	3	62	Father	0	Function: breakfast		
11	10	3	62	Father	0	Transition: 16		[1-LivingRoom,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
12	11	3	62	Father	0	Transition: 22		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
13	12	3	62	Father	0	Transition: 23		[18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
14	13	3	62	Father	0	Transition: 22		[18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
15	14	3	62	Father	0	Transition: 23		[18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
16	15	3	62	Father	0	Transition: 22		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
17	16	3	62	Father	0	Transition: 23		[18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
18	17	3	62	Father	0	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
19	18	3	62	Father	0	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
20	19	3	62	Father	0	Transition: 23		[18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
21	20	3	62	Father	0	Transition: 23		[18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
22	21	3	62	Father	0	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
23	22	3	62	Father	0	Transition: 9		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
24	23	3	62	Father	0	Function: cleanUp		
25	24	3	62	Father	0	Transition: 8		[5-Kitchen,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
26	25	3	62	Father	0	Transition: 24		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
27	26	3	62	Father	0	Transition: 25		[18-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
28	27	3	62	Father	0	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
29	28	3	62	Father	0	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
30	29	3	62	Father	0	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
31	30	3	62	Father	0	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
32	31	3	62	Father	0	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
33	32	3	62	Father	0	Transition: 22		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
34	33	3	62	Father	0	Transition: 23		[18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
35	34	3	62	Father	0	Transition: 22		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
36	35	3	62	Father	0	Transition: 23		[18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
37	36	3	62	Father	0	Transition: 22		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
38	37	3	62	Father	0	Transition: 23		[18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
39	38	3	62	Father	0	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
40	39	3	62	Father	0	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
41	40	3	62	Father	0	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
42	41	3	62	Father	0	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
43	42	3	62	Father	0	Transition: 22		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
44	43	3	62	Father	0	Transition: 23		[18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
45	44	3	62	Father	0	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
46	45	3	62	Father	0	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
47	46	3	62	Father	0	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
48	47	3	62	Father	0	Transition: 24		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
49	48	3	62	Father	0	Transition: 25		[18-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
50	49	3	62	Father	0	Transition: 24		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
51	50	3	62	Father	0	Transition: 25		[18-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
52	51	3	62	Father	0	Transition: 24		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
53	52	3	62	Father	0	Transition: 25		[18-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
54	53	3	62	Father	0	Transition: 30		[2-Guestroom,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
55	54	3	62	Father	0	Transition: 31		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
56	55	3	62	Father	0	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
57	56	3	62	Father	0	Transition: 22		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
58	57	3	62	Father	0	Transition: 23		[18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
59	58	3	62	Father	0	Transition: 22		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,18-Bath1]
60	59	3	62	Father	0	Transition: 23		[18-Bath1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
61	60	3	62	Father	0	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
62	61	3	62	Father	0	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
63	62	3	62	Father	0	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
64	63	3	62	Father	0	Transition: 30		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,2-Guestroom]
65	64	3	62	Father	0	Function: Office work		
66	65	3	62	Father	0	Transition: 31		[2-Guestroom,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
67	66	3	62	Father	0	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
68	67	3	62	Father	0	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
69	68	3	62	Father	0	Transition: 9		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
70	69	3	62	Father	0	Transition: 7		[5-Kitchen,Barrier-free,Door,6-Storeroom]
71	70	3	62	Father	0	Transition: 6		[6-Storeroom,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
72	71	3	62	Father	0	Transition: 7		[5-Kitchen,Barrier-free,Door,6-Storeroom]
73	72	3	62	Father	0	Transition: 5		[6-Storeroom,Barrier-free,Door,7-Gate]
74	73	3	62	Father	0	Transition: 3		[7-Gate,Barrier-free,Door,8-Garage]
75	74	3	62	Father	0	Function: car		

Abbildung 74: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall "Morgens 62", Simulationsergebnis

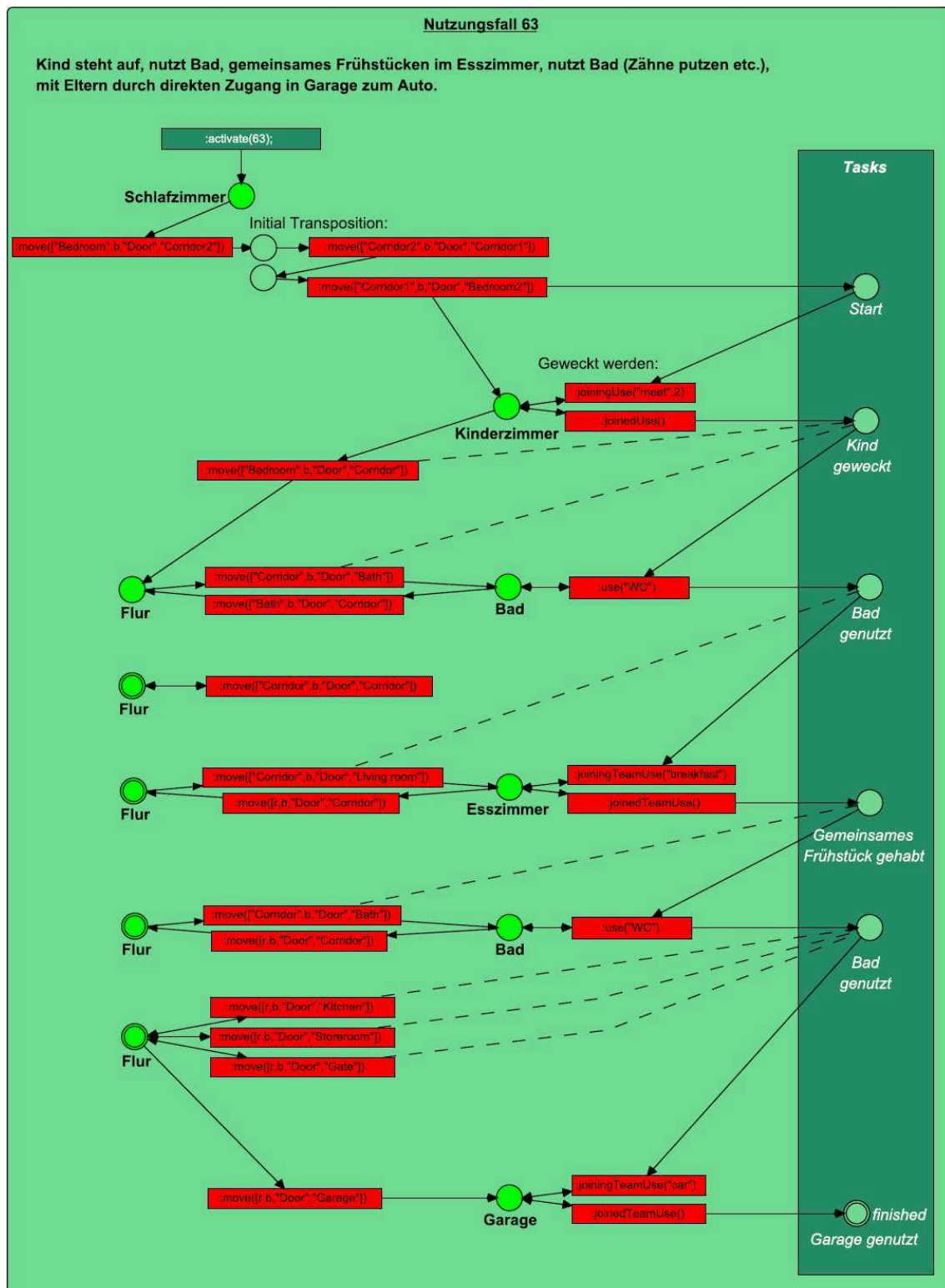


Abbildung 75: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall "Morgens 63"

Rohdatei:

```

17, 2, 63, Child, -1, Transition: 17, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,1-LivingRoom]
27, 2, 63, Child, -1, Transition: 24, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
22, 2, 63, Child, -1, Function: breakfast
35, 2, 63, Child, -1, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
42, 2, 63, Child, -1, Transition: 5, [6-Storeroom,Barrier-free,Door,7-Gate]
30, 2, 63, Child, -1, Transition: 25, [16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
6, 2, 63, Child, -1, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
43, 2, 63, Child, -1, Transition: 4, [7-Gate,Barrier-free,Door,6-Storeroom]
23, 2, 63, Child, -1, Transition: 16, [1-LivingRoom,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
2, 2, 63, Child, -1, Transition: 38, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,15-Bedroom2]
7, 2, 63, Child, -1, Transition: 24, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
14, 2, 63, Child, -1, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
41, 2, 63, Child, -1, Transition: 7, [5-Kitchen,Barrier-free,Door,6-Storeroom]
20, 2, 63, Child, -1, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
46, 2, 63, Child, -1, Function: car
8, 2, 63, Child, -1, Function: WC
9, 2, 63, Child, -1, Transition: 25, [16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
10, 2, 63, Child, -1, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
24, 2, 63, Child, -1, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
25, 2, 63, Child, -1, Transition: 24, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
31, 2, 63, Child, -1, Transition: 24, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
19, 2, 63, Child, -1, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
Nr, Usecase, Act.-Type, Role, Use-Or., Use, Specification1, Specification2
29, 2, 63, Child, -1, Transition: 24, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
5, 2, 63, Child, -1, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
3, 2, 63, Child, -1, Function: meet
39, 2, 63, Child, -1, Transition: 7, [5-Kitchen,Barrier-free,Door,6-Storeroom]
37, 2, 63, Child, -1, Transition: 7, [5-Kitchen,Barrier-free,Door,6-Storeroom]
0, 2, 63, Child, -1, Transition: 21, [19-Bedroom1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
1, 2, 63, Child, -1, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
38, 2, 63, Child, -1, Transition: 6, [6-Storeroom,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
28, 2, 63, Child, -1, Transition: 25, [16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
4, 2, 63, Child, -1, Transition: 39, [15-Bedroom2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
34, 2, 63, Child, -1, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
15, 2, 63, Child, -1, Transition: 17, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,1-LivingRoom]
11, 2, 63, Child, -1, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
26, 2, 63, Child, -1, Transition: 25, [16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
12, 2, 63, Child, -1, Transition: 19, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
13, 2, 63, Child, -1, Transition: 18, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
45, 2, 63, Child, -1, Transition: 3, [7-Gate,Barrier-free,Door,8-Garage]
21, 2, 63, Child, -1, Transition: 17, [17-Corridor2,Barrier-free,Door,1-LivingRoom]
36, 2, 63, Child, -1, Transition: 9, [9-Corridor1,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
40, 2, 63, Child, -1, Transition: 6, [6-Storeroom,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
32, 2, 63, Child, -1, Function: WC
18, 2, 63, Child, -1, Transition: 16, [1-LivingRoom,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
33, 2, 63, Child, -1, Transition: 25, [16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
44, 2, 63, Child, -1, Transition: 5, [6-Storeroom,Barrier-free,Door,7-Gate]
16, 2, 63, Child, -1, Transition: 16, [1-LivingRoom,Barrier-free,Door,17-Corridor2]

```

Aufbereitete Datei:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Nr	Usecase	Act.-Type	Role	Use-Or.	Use	Specification1	Specification2
2	0	2	63	Child	-1	Transition: 21		[19-Bedroom1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
3	1	2	63	Child	-1	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
4	2	2	63	Child	-1	Transition: 38		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,15-Bedroom2]
5	3	2	63	Child	-1	Function: meet		
6	4	2	63	Child	-1	Transition: 39		[15-Bedroom2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
7	5	2	63	Child	-1	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
8	6	2	63	Child	-1	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
9	7	2	63	Child	-1	Transition: 24		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
10	8	2	63	Child	-1	Function: WC		
11	9	2	63	Child	-1	Transition: 25		[16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
12	10	2	63	Child	-1	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
13	11	2	63	Child	-1	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
14	12	2	63	Child	-1	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
15	13	2	63	Child	-1	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
16	14	2	63	Child	-1	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
17	15	2	63	Child	-1	Transition: 17		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,1-LivingRoom]
18	16	2	63	Child	-1	Transition: 16		[1-LivingRoom,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
19	17	2	63	Child	-1	Transition: 17		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,1-LivingRoom]
20	18	2	63	Child	-1	Transition: 16		[1-LivingRoom,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
21	19	2	63	Child	-1	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
22	20	2	63	Child	-1	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
23	21	2	63	Child	-1	Transition: 17		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,1-LivingRoom]
24	22	2	63	Child	-1	Function: breakfast		
25	23	2	63	Child	-1	Transition: 16		[1-LivingRoom,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
26	24	2	63	Child	-1	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
27	25	2	63	Child	-1	Transition: 24		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
28	26	2	63	Child	-1	Transition: 25		[16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
29	27	2	63	Child	-1	Transition: 24		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
30	28	2	63	Child	-1	Transition: 25		[16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
31	29	2	63	Child	-1	Transition: 24		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
32	30	2	63	Child	-1	Transition: 25		[16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
33	31	2	63	Child	-1	Transition: 24		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,16-Bath2]
34	32	2	63	Child	-1	Function: WC		
35	33	2	63	Child	-1	Transition: 25		[16-Bath2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
36	34	2	63	Child	-1	Transition: 19		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,17-Corridor2]
37	35	2	63	Child	-1	Transition: 18		[17-Corridor2,Barrier-free,Door,9-Corridor1]
38	36	2	63	Child	-1	Transition: 9		[9-Corridor1,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
39	37	2	63	Child	-1	Transition: 7		[5-Kitchen,Barrier-free,Door,6-Storeroom]
40	38	2	63	Child	-1	Transition: 6		[6-Storeroom,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
41	39	2	63	Child	-1	Transition: 7		[5-Kitchen,Barrier-free,Door,6-Storeroom]
42	40	2	63	Child	-1	Transition: 6		[6-Storeroom,Barrier-free,Door,5-Kitchen]
43	41	2	63	Child	-1	Transition: 7		[5-Kitchen,Barrier-free,Door,6-Storeroom]
44	42	2	63	Child	-1	Transition: 5		[6-Storeroom,Barrier-free,Door,7-Gate]
45	43	2	63	Child	-1	Transition: 4		[7-Gate,Barrier-free,Door,8-Garage]
46	44	2	63	Child	-1	Transition: 5		[6-Storeroom,Barrier-free,Door,7-Gate]
47	45	2	63	Child	-1	Transition: 3		[7-Gate,Barrier-free,Door,8-Garage]
48	46	2	63	Child	-1	Function: car		

Abbildung 76: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Nutzungsfall "Morgens 63", Simulationsergebnis

Die entworfene Gebäudetopologie aus Abbildung 68 ist eine graphische Repräsentation der räumlichen Zusammenhänge, die den Nutzungsanforderungen entsprechen, welche durch die Nutzungsfälle spezifiziert wurden. Der Topologie-Graph hat keine geometrische Dimension. Die Angaben der Raumübergangstransitionen, die Kapazitäten der Raum-Stellen und die Beziehungen zwischen diesen sind Vorgaben für den geometrischen Entwurf des Gebäudemodells. Die Beziehungen zwischen den Räumen mit ihren Raumübergängen implizieren die Anordnung der Räume im Grundriss. Die Kapazitäten sind Vorgaben für die Raumgrößen. Die Angaben zur Barriere und zum Übergangstyp gehen in die Wahl der verbindenden Bauteile sowie die Maße der anschließenden Räume ein. Beispielsweise deutet ein barrierefreier Übergang auf Rollstuhleignung hin, so dass das Türmaß und die Breite des anschließenden Flurs entsprechend zu wählen ist. Bei der Abbildung des Gebäudemodells auf ein geometrisches Modell kann die in 5.2 vorgeschlagene Unterstützung beim Übergang vom Gebäudetopologiemodell zu einem BIM-Modell angewendet werden. In diesem Beispiel ist zur Veranschaulichung dieses Vorgehens ein Vorentwurf erstellt worden und in Abbildung 77 dargestellt. Das Diagramm enthält das überlagerte Topologie-Netz des Gebäudetopologiemodells. Es sind auch weitere triviale Räume eingetragen, die in den geprüften Nutzungsfällen nicht auftreten.

Dieses Beispiel zeigt die Verwendung des methodischen Vorgehens auf Basis des entwickelten Petrinetz basierenden Modells im Individualentwurf anhand eines Einfamilienhauses. Aus dem Beispiel werden auch Ansatzpunkte für eine weiterführende Forschung und Entwicklung der Methode sichtbar, die diesen Ansatz nicht grundsätzlich in Frage stellen oder die Grundidee verändern. Es geht um Erweiterungen und Verfeinerungen in den folgenden Elementen Modell, Methode, Verwendung und Werkzeugunterstützung.

Modell: Das zugrunde liegende Metamodell erlaubt nur eingeschränkt die Eliminierung zufälligen Verhaltens der Nutzungsfallnetzinstanzen. Wie zu den oben genannten Nutzungsfällen 4 und 5 diskutiert, führt dies zu „unnötigen“ Bewegungen bezüglich der Eignungsprüfung. Zwar kann durch die Modellierung der Nutzungsorientierung eine Priorität zwischen funktions- und bewegungsorientierter Nutzung vorgegeben werden. Die Modellierung einer zielgerichteten Bewegung einer Nutzungsfallinstanz wäre eine Erweiterung, die die „unnötigen“ Bewegungen reduzierte. Dadurch könnte dann nicht nur die grundsätzliche Eignung, sondern auch die Effizienz der Nutzung durch Bewegungsmessungen ermittelt werden.

Methode: Die Modellierung zielgerichteter Bewegung wäre Grundlage der Messung von Bewegungen in einer Gebäudetopologie. Die Simulation ist dann um entsprechende Messwerkzeuge zu erweitern, die durch Messpunkte und Protokollierungen der Bewegungsnutzung einzelner Nutzungsfallinstanzen Daten für Analysen erheben. Diese Daten könnten dann zur Optimierung der Gebäudetopologie, also der Anordnung von Räumen und Übergangsbeziehungen sowie der Platzierung von Funktionsangeboten, verwendet werden.

Verwendung: Durch die genannte Erweiterung zielgerichteter Bewegung kann als neue Verwendung die Optimierung einer Gebäudelogistik erschlossen werden, wobei hier die vorhandene Möglichkeit der Modellierung von Nutzungsfalltypen und Erzeugung entsprechend verschiedener Nutzungsfallinstanzen genutzt werden kann. In den Optimierungsprozess würden diese Instanzen eingebracht, die ihre eigene Nutzungsanforderung haben und dadurch ihre Nutzung des Gebäudes bestimmen.

Werkzeugunterstützung: Die Modellbildung für dieses Beispiel ist trotz Rückgriff auf das Petrinetz-Werkzeug Renew [Renew 2015] aufwändig, da dieses die Erstellung beliebiger Petrinetze unterstützt und somit die inhärenten Vorgaben der hier definierten Netze für Gebäudetopologie und Nutzungstopologie durch den Entwerfer eingehalten werden müssen. Ein spezialisierter Editor würde die Akzeptanz im praktischen Einsatz herstellen. Dieser Editor sollte die Erstellung einerseits von Nutzungstopologie-Netzen und andererseits von Topologie-Netzen des Gebäudetopologiemodells unterstützen. Dabei sollte eine Verbindung existieren, die die Bildung von Gebäudetopolo-

gie-Ausschnitten aus Nutzungsfällen erlaubt, also das Vorgehen unterstützt, welches auch in diesem Beispiel gezeigt wurde. Schließlich ist eine Integration der Werkzeuge für diese Modellierungsmethode und BIM erforderlich, um den iterativ-inkrementellen Entwurf von Gebäudetopologiemodell und BIM-Modell, insbesondere geometrisch/technisches Modell, zu verzahnen.

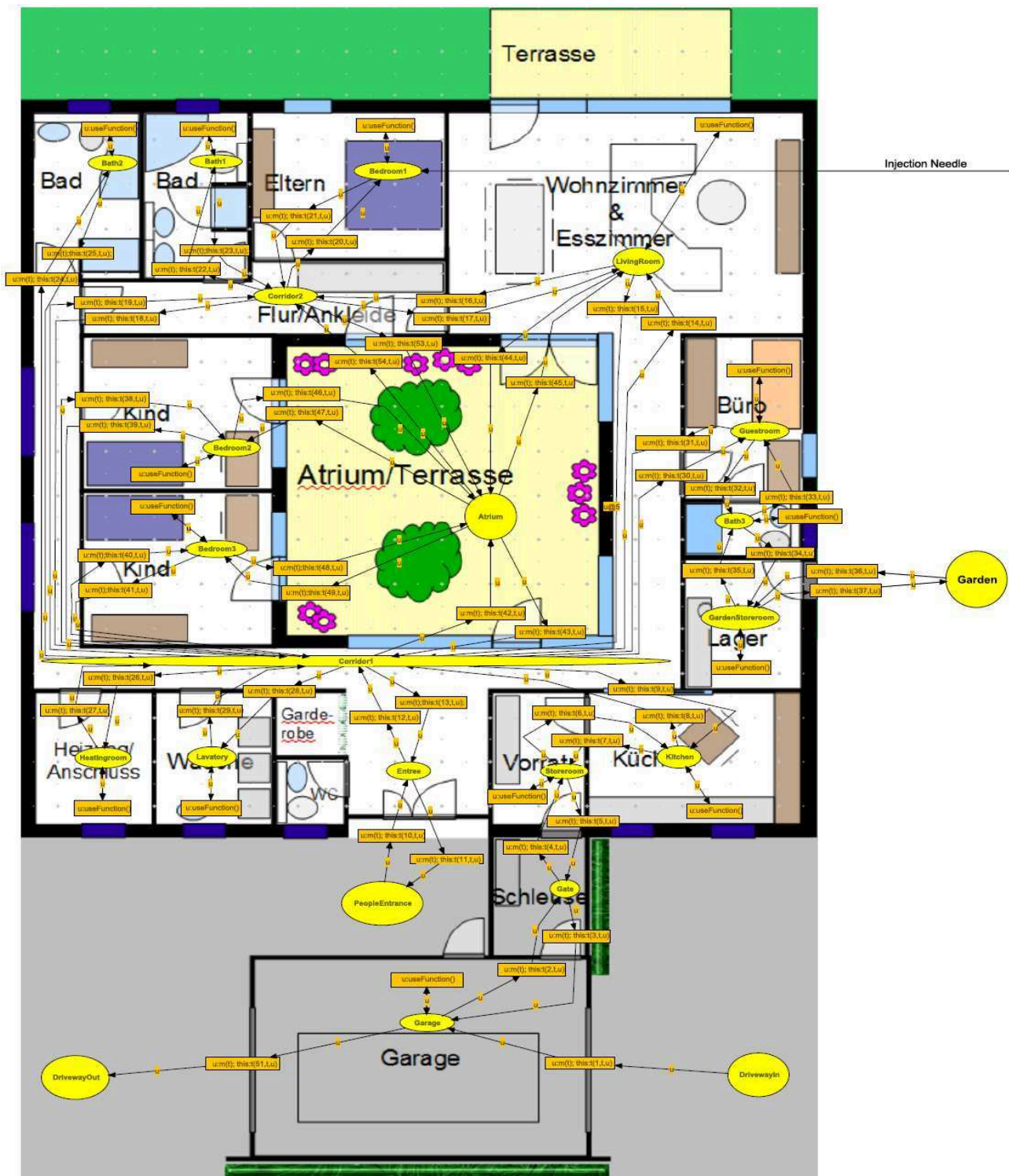


Abbildung 77: Verwendung im Entwurf eines Individualbaus — Gebäudetopologiemodell und Grundriss

6.2 Verwendung zur Diagnose am Beispiel einer Zahnarztpraxis

Die Verwendung der Methode zur Diagnose wird anhand eines einfachen Beispiels einer Zahnarztpraxis gezeigt, welches die wesentlichen Aspekte der Modellierungsbasis umfasst und das methodische Vorgehen sowie den Realisierungsansatz in den Vordergrund stellt. Die Zahnarztpraxis erfordert verschiedene Nutzerrollen, Zugangsberechtigungen, Kapazitäten und die gemeinsame Nutzung für die Behandlung von Patienten; sie soll unterschiedliche Nutzungsabläufe ermöglichen. Eine Skalierung in den Dimensionen der Komplexität des Gebäudes und seines Topologiemodells, in der Zahl der Nutzungsfälle, der Anzahl der Raumfunktionen und der simulierten Nutzungsfallinstanzen ist möglich und würde im Beispiel keinen zusätzlichen Erkenntnisgewinn liefern. Das Beispiel wurde in 2.2 zur Einleitung und Motivation eingeführt. Die Diagnose bezieht sich in diesem Beispiel auf die Bestandsprüfung eines Gebäudes im Rahmen der Suche für eine vordefinierte Nutzung. Orientiert an der Verwendungsbeschreibung in 5.3.4 für die *Verwendung zur Diagnose* lautet die *Fragestellung*: Ist ein gegebenes Gebäude bzw. eine Gebäudeeinheit für eine definierte Nutzung geeignet? Zur Beantwortung sind folgende Schritte zu vollziehen:

1. Lösung der *Aufgaben* zur Beantwortung dieser Fragestellung:
 - Die Nutzung ist objektiv und möglichst formalisiert zu beschreiben. Die Nutzung ist durch möglicherweise mehrere Nutzungsfälle zu formulieren.
 - Das Gebäude muss formalisiert beschrieben werden, so dass die angebotenen Funktionen pro Raum und die Raumübergänge mit ihren Eigenschaften für die Untersuchung modelliert sind.
2. Die Bearbeitung der Aufgaben soll auf Basis des methodischen Vorgehens aus 5.3.3 erfolgen.

Die Bearbeitung wird durch *Vorgehensweisen* zur Modellierung mit der vorgestellten Methode unterstützt, hier durch das Vorgehen (B) für das Reengineering des zur untersuchenden Gebäudes in ein Gebäudetopologiemodell und methodisch durch (1) und (2), also Abstraktion und basierend auf dem Rahmenwerk für eine Gebäudetopologie.⁹⁴ Das Reengineering kann getrennt von den weiteren Schritten erfolgen und ist notwendig für die Prüfung der formal spezifizierten Nutzungsfälle. Die Nutzungsfälle spezifizieren die Anforderungen an die Nutzung. Die textuell formulierten Anforderungen an die Nutzung werden als Nutzungsfälle in ein graphisches Modell auf Basis dieser Methode und des hier eingeführten Metamodells für Nutzungsfälle überführt. Hierbei wird die Vorbereitung der Eignungsprüfung — Methode (E) — verwendet, wobei die Terminologie der Raumübergänge und Funktionen zwischen Nutzungsfällen und Gebäudetopologiemodell abgestimmt wird. Das genaue Gebäudetopologiemodell muss nicht bekannt sein. Es soll auch nicht bekannt sein, denn die Diagnose nutzt die Nutzungsforderung als Anfrage gegen das Gebäudetopologiemodell, und im Ergebnis zeigen sich Nutzungsmöglichkeiten oder Hindernisse. Die Überprüfung der Nutzbarkeit des Gebäudes anhand spezifizierter Nutzungsfälle erfolgt durch das Vorgehen der Eignungsprüfung des Gebäudetopologiemodells für die Nutzungsfälle durch anschauliche Simulation der Gebäudenutzung, d. h. Unterstützung durch Vorgehen (C) und methodisch durch (3) und (4). Bestandteil ist die Machbarkeitsprüfung, die notwendige Anpassungen des Gebäudes und der Nutzungsfälle darstellen kann. Dieser Abgleich ist in 5.3.3 im Zusammenhang mit dem Vorgehen in der Phase der Planung beschrieben, d. h. Unterstützung durch Vorgehen (D) und methodisch durch (7). Die Planung von baulichen Anpassungen ist das Ergebnis einer Machbarkeitsprüfung, die verzahnt ist mit der Eignungsprüfung für die Nutzung.

⁹⁴ In den folgenden Ausführungen wird mit den geklammerten Buchstaben und Ziffern stets auf Abbildung 46, S. 153, und Tabelle 18, S. 150, der Abschnitte 5.3.3 bzw. 5.3.2 verwiesen.

Begonnen wird mit der Modellbildung der Nutzungsfälle für die folgenden Nutzungsanforderungen. Für eine Zahnarztpraxis, die zukünftig auch kieferorthopädische Leistungen erbringen soll, werden neue Räumlichkeiten gesucht. Der Betrieb der Zahnarztpraxis umfasst Ärzte, Assistenten (zahnmedizinische Fachangestellte) und Patienten. Erforderlich ist eine Gebäudeeinheit, deren Grundriss einen Empfang, ein Wartezimmer, mehrere Behandlungszimmer, einen Laborraum für Röntgen und Präparationen, ein WC auch für Patienten und einen Personalraum umfasst. Die Praxisräume sollen für Patienten barrierefrei nutzbar sein.

Die Anforderungen der Nutzung sind in folgenden Nutzungsfällen formuliert, die wie folgt nummeriert sind:

1. Ein Arzt betritt die Zahnarztpraxis und nutzt zunächst den Personalraum zum Umkleiden. Umgekleidet behandelt er Patienten zusammen mit zahnmedizinischen Fachangestellten, wechselt Behandlungsräume, nutzt das Labor und geht hin und wieder zur Pause in den Personalraum.
2. Ein zahnmedizinischer Fachangestellter betritt die Zahnarztpraxis und nutzt zunächst den Personalraum zum Umkleiden. Umgekleidet assistiert er dann bei Behandlungen, wechselt Behandlungsräume, arbeitet im Labor und geht hin und wieder zur Pause in den Personalraum.
3. Ein Patient betritt die Zahnarztpraxis, meldet sich an, wartet, wird behandelt, vereinbart eventuell einen Folgetermin und verlässt die Praxis. Er kann sich hierbei barrierefrei bewegen.
4. Eine WC-Nutzung soll möglich sein. Hierbei reicht die Barriereanforderung bis hin zur Barrierefreiheit.
5. Ein Labor für Röntgen oder Zahnersatz-Behandlung an einem Patienten durch einen Arzt und einen zahnmedizinischen Fachangestellten kann barrierefrei erreicht und genutzt werden.

Nach dem Vorgehen wird für jeden Nutzungsfall ein Modell gebildet. Die Modelle sind in den Abbildungen 78 bis 82 als Petrinetz-Diagramme dargestellt. Das Diagramm für den Arzt im Nutzungsfall 1 beschreibt, dass der Arzt über einen Zugang von Außen in die Praxisräume gelangt. Die Räume sind nicht genauer topologisch beschrieben, da es keine besondere Anforderung gibt. Der Arzt pendelt zwischen einem Personalraum, einem Behandlungsraum und einem Labor. Es ist auch hier nicht festgelegt, ob es mehrere gibt. Spezifiziert ist aber, dass der Arzt erst nach dem Umkleiden die Behandlungs- und Laborräume betreten kann. Das Funktionsangebot des Umziehens ist dem Personalraum zugeordnet, genauer, einem Raum, der hier zur besseren Lesbarkeit als Personalraum bezeichnet wird. Diese Namensgebung ist aber beliebig und wird nicht bei der Prüfung der Nutzbarkeit ausgewertet. Relevant ist die durch den Graphen spezifizierte topologische Struktur, nicht aber die geometrische Anordnung in einem Grundriss. Im Behandlungsraum und Labor sind gemeinsam zu nutzende Funktionen spezifiziert (joined Team Use). Der Nutzungsfall 2 ist ähnlich definiert.

Nutzungsfall 3 spezifiziert den Ablauf einer Behandlung aus Sicht eines Patienten. Deutlich wird hier der Fokus auf den Nutzungsablauf, der nicht die Anordnung von Räumen detailliert vorschreibt, sondern nur die topologischen Strukturen fordert, die für den Nutzungsablauf während einer Behandlung als notwendig definiert werden. Das sind der Zugang zur Praxis mit einem Bereich zur Anmeldung, die anschließende Möglichkeit des Wartens in einem Raum und dann die anschließende Behandlung in einem Raum, wobei die Räume barrierefrei über Flure zugänglich sein sollen. Durch die Tasks wird eine Ablauffolge spezifiziert, die auch Bewegungen durch erledigte Funktionsnutzung steuert. Beispielsweise soll das Wartezimmer erst nach Anmeldung aufgesucht werden, das Behandlungszimmer wird nach dem Warten genutzt, ein Termin kann erst nach der

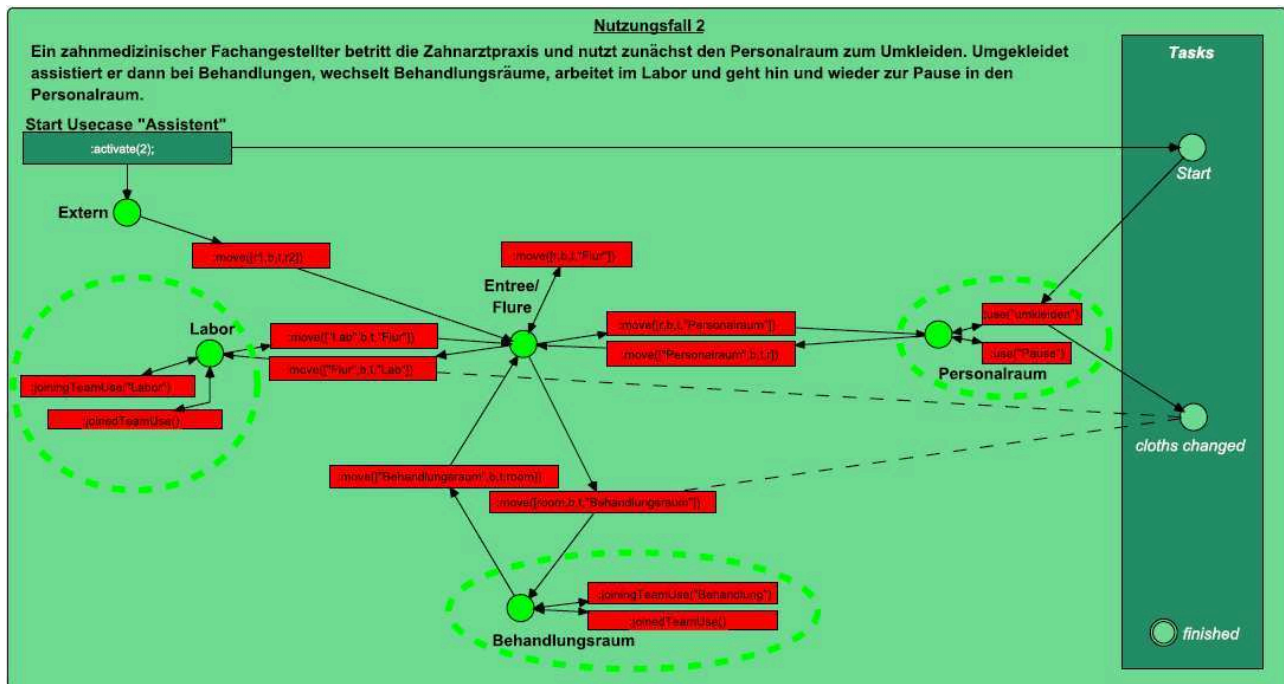


Abbildung 79: Verwendung in der Diagnose — Nutzungsfall 2 "Assistent"

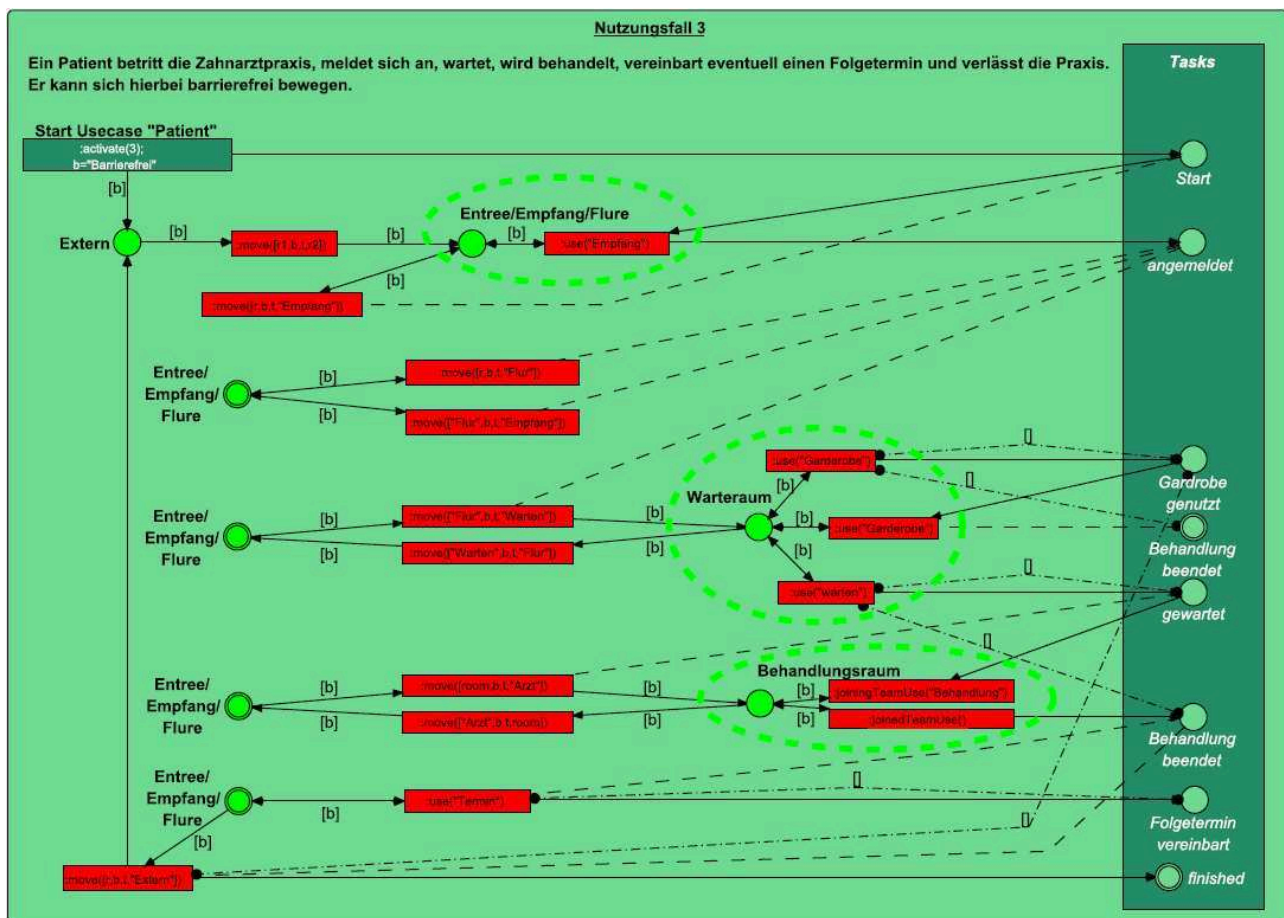


Abbildung 80: Verwendung in der Diagnose — Nutzungsfall 3 "Patient"

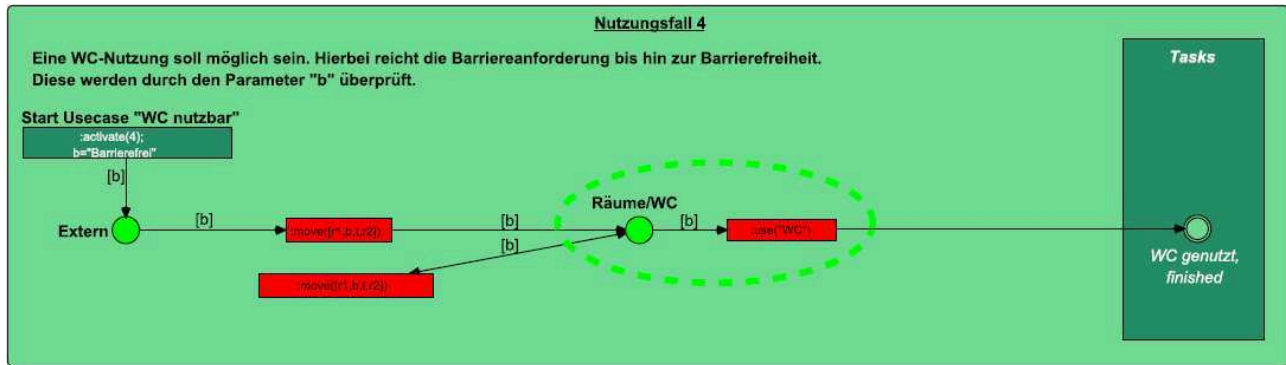


Abbildung 81: Verwendung in der Diagnose — Nutzungsfall 4 "WC nutzbar"

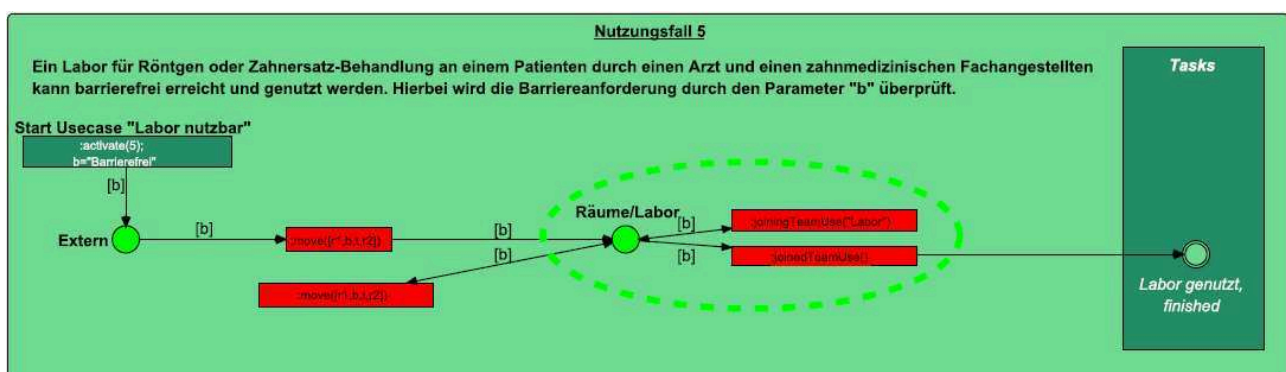


Abbildung 82: Verwendung in der Diagnose — Nutzungsfall 5 "Labor nutzbar"

Die durch diese Nutzungsfälle spezifizierte Nutzungsanforderung soll in diesem Beispiel die Beurteilung einer Gebäudeeinheit formal unterstützen. Bei der Gebäudeeinheit handelt es sich um die Räume einer HNO-Praxis.⁹⁵ Der Grundriss ist entnommen aus [Neufert 2016], S. 546, und in Abbildung 83 dargestellt. Dieser Grundriss wird als Bildzitat verwendet, da der Autor dieser Arbeit im Folgenden die Vorstellung seiner Modellierungsmethode und seines Realisierungsansatzes anhand eines Grundrisses erläutern möchte, der mit [Neufert 2016] einer Quelle entstammt, die als Referenzwerk der Bauentwurfslehre geltend anerkannte Grundrissreferenzen enthält, die keinen Anlass geben, in ihrer Güte sowie ihrer Stellung als neutrale Referenz angezweifelt zu werden. Nach dem oben referenzierten Vorgehen des Reengineerings wird aus diesem Grundriss aufgrund von eventuell vorhandenen geometrischen Informationen oder weiteren Annahmen ein Gebäudetopologiemodell abgeleitet, dessen Topologie-Netz in Abbildung 85 und dessen zugehöriges Spezifikationsnetz in den Abbildungen 86 und 87 dargestellt ist. Abbildung 84 gibt den Zusammenhang zwischen geometrischer Darstellung des Grundrisses und dem topologischen Modell wieder, welches durch Reengineering auf Basis der in 5.2 dargestellten Abbildungsmöglichkeit entsteht. Entsprechend der dort vorgeschlagenen Abbildungen zwischen Elementen eines BIM-Modells, welches Elemente des Grundrisses umfasst, und dem Gebäudetopologiemodell werden die Raum-Stellen und Raumübergangstransitionen gebildet und in Beziehung gesetzt. Die Raumfunktionstransitionen werden aus den Beschriftungen und Raumbezeichnungen des Grundrisses abgeleitet. Sie sind im Spezifikationsnetz den Raum-Stellen zugeordnet. Hier ist beispielhaft gezeigt, dass mehrere Begriffe verwendet werden sollten, die die angebotenen Funktionen beschreiben. Eine Ontologie wäre für eine Werkzeugunterstützung wünschenswert, ist aber keine entscheidende Kom-

⁹⁵ HNO ist die Akürzung für die Fachrichtung Hals-Nasen-Ohren Medizin.

ponente der Idee dieses Ansatzes.

Die weiteren Spezifikationen ohne topologische Eigenschaften sind im Spezifikationsnetz definiert. Die Raumgrößen werden den Darstellungen des Grundrisses entnommen. Ein geometrisch vollständig spezifiziertes Modell bzw. ein bemaßter Grundriss ist allerdings Voraussetzung für eine exakte Abbildung auf das Gebäudetopologiemodell. In diesem Beispiel wurden daher Annahmen aus den geschätzten Maßen des Grundrisses und dem erfahrungsgemäßen Zuschnitt der Räume getroffen. Das Spezifikationsnetz umfasst die angenommenen Raumkapazitäten für Personen der Nutzungsfälle. Diese sind den Raum-Stellen durch die Funktion *defRC* des Metamodells⁹⁶ zugeordnet. Die Raumbesetzung wird für alle Räume mit 0 angenommen (*defRA*). Im Regelwerk *Room Transition Types and Barrier Definitions* des Spezifikationsnetzes werden die Raumübergangstypen und Barriereangaben für die Raumübergangstransitionen spezifiziert. Die Spezifikation des Raumübergangstyps, also eine Tür, eine Treppe oder ein Durchgang etc., erfolgt durch Zuordnung der entsprechenden Bezeichnung zu den Raumübergangstransitionen. Aus dem Grundriss ist weiterhin die Barriereangabe abzuleiten. Es wird in diesem Beispiel zugeordnet, welche Raumübergänge barrierefrei sind, welche für eine außergewöhnliche Gehbehinderung (Kennzeichen „aG“) geeignet sind und welche nur für eine einfache Gehbehinderung („G“) und ungehinderte Personen geeignet sind. Wegen fehlender Maße werden auch für dieses Beispiel Annahmen getroffen. Aus einem BIM-Modell mit Maßen können diese Zuordnungen automatisiert erstellt werden. Der letzte relevante Punkt für das Gebäudetopologiemodell ist die Spezifikation von Zugangsberechtigungen. Diese sind nicht aus einem geometrischen Modell bzw. Diagramm ableitbar. Hierzu ist die Kenntnis der Fachdomäne, der Nutzerrollen und Prozesse erforderlich. Eine Spezifikation erfolgt durch den Modellierer, der in diesem Beispiel definiert, dass der dargestellte Raumbereich PERSONAL und das Labor keinen Zutritt für Patienten gestattet. Im Spezifikationsnetz wird im Regelwerk *Room Access Definitions* zu den Raumübergangstransitionen spezifiziert, welche Rollen erlaubt oder verboten sind.

Das Spezifikationsnetz umfasst darüber hinaus eine Spezifikation der topologischen Struktur, die im Topologie-Netz graphisch dargestellt ist. Dies ist, wie in 5.1 erläutert, notwendig, da die Regelwerke des Metamodells auf Basis des spezifizierten Gebäudetopologiemodells die Bewegung und Funktionsnutzung berechnen bzw. auswerten.

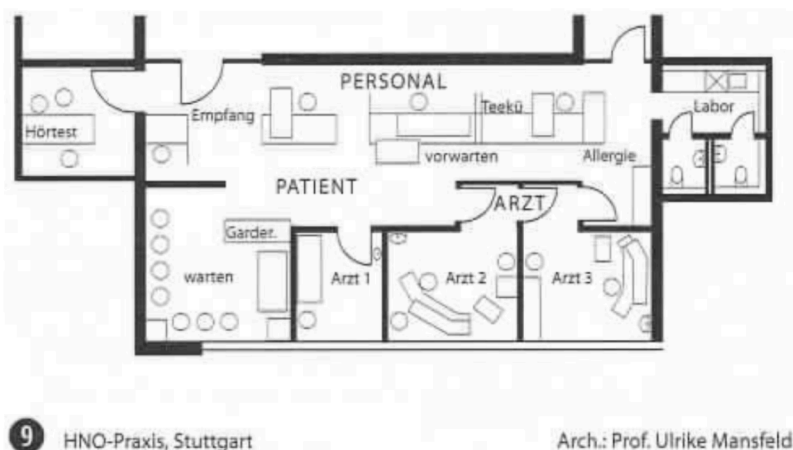


Abbildung 83: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Bestandspraxis, Grundriss
Quelle: [Neufert 2016], S. 546

96 Vergleiche 5.1.1.

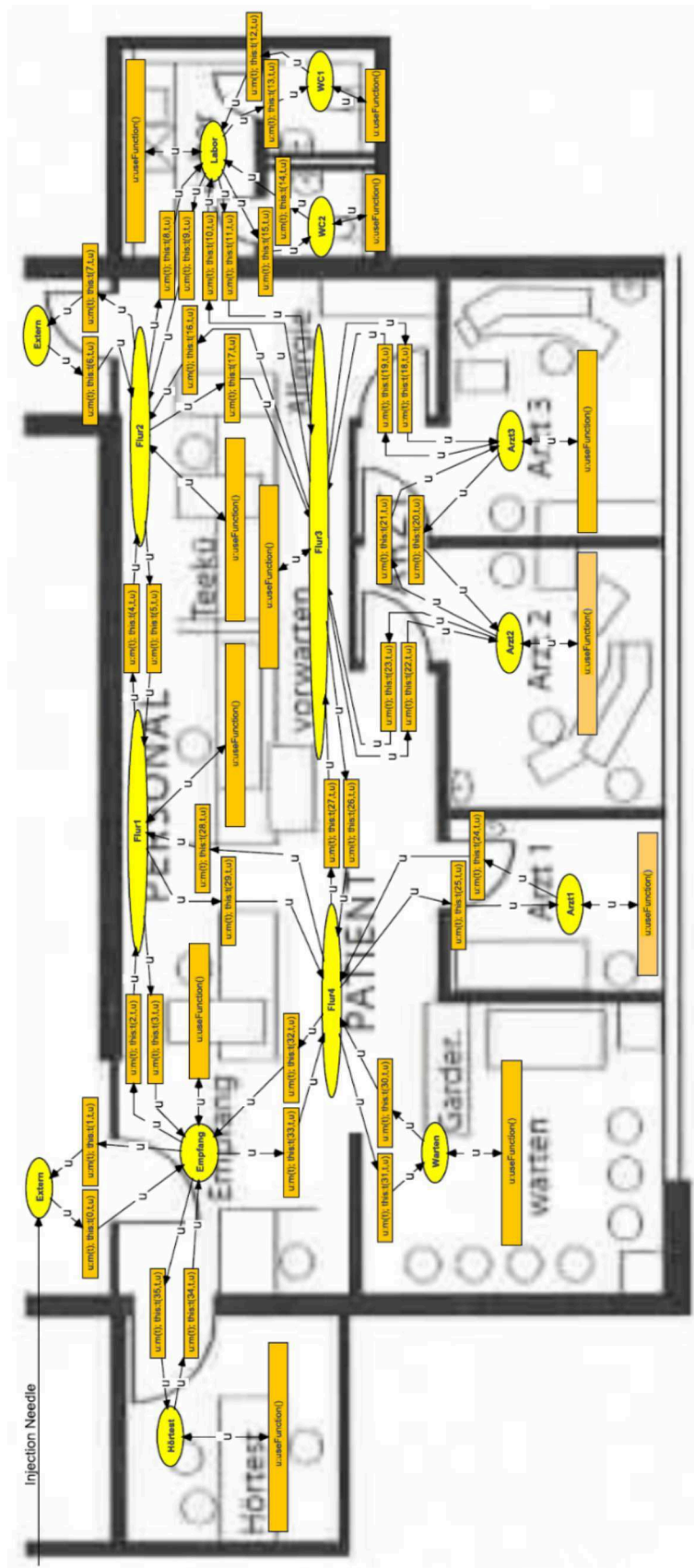
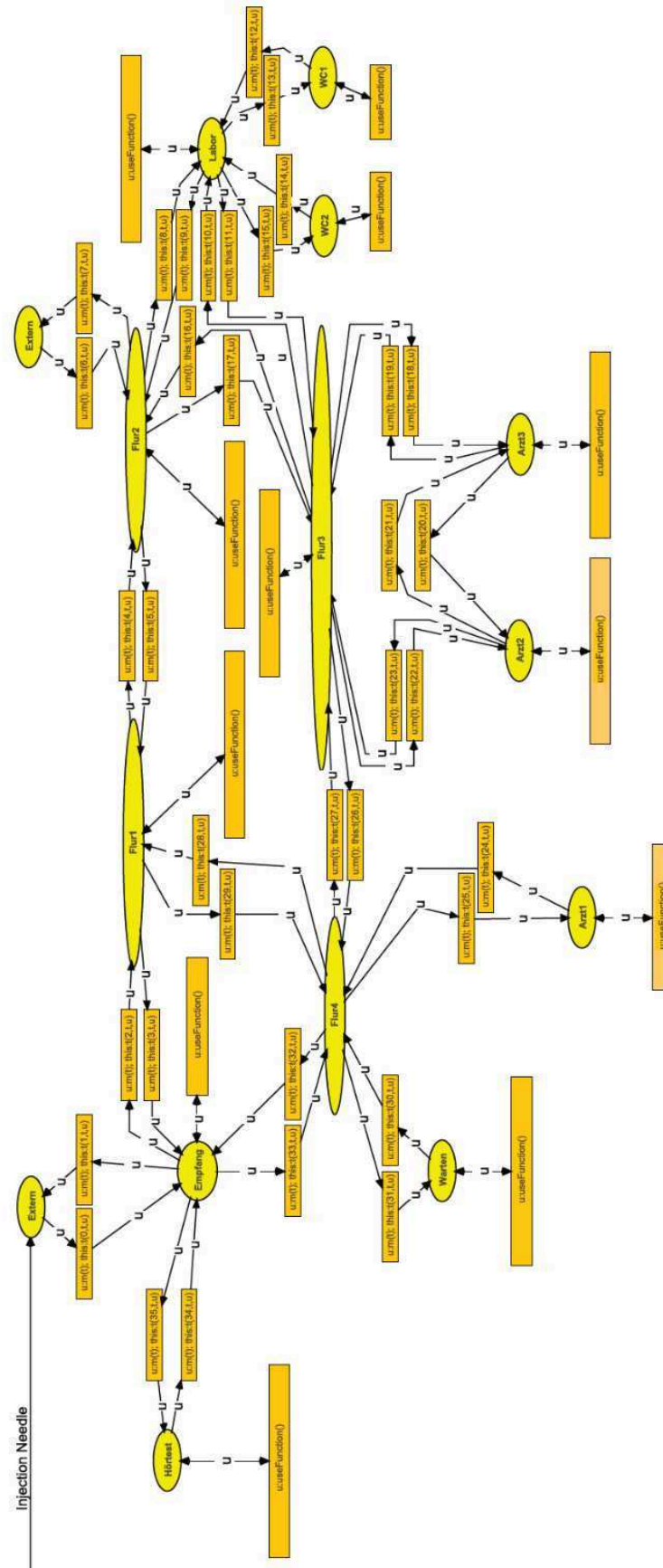
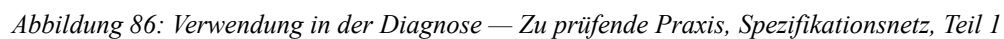


Abbildung 84: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Grundriss aus Abbildung 83, Topologie-Netz
 Quelle aus Abbildung 83: [Neufert 2016], S. 546, Ausschnitt, ergänzt durch Einzeichnen eines Topologie-Netzes





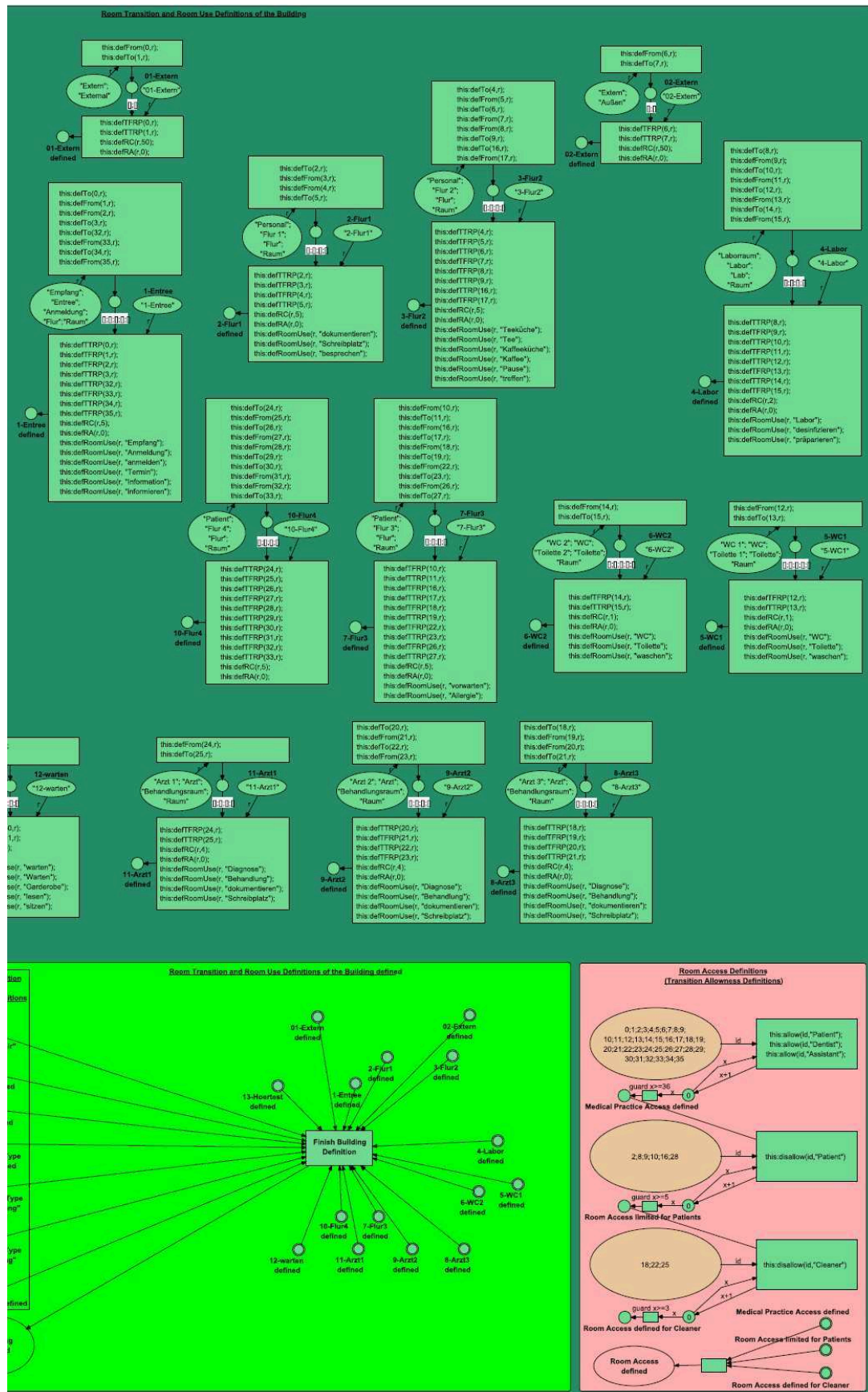


Abbildung 87: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Spezifikationsnetz, Teil 2

Auf der Basis der spezifizierten Nutzungsfälle und des Gebäudetopologiemodells erfolgt nach dem eingangs beschriebenen Vorgehen⁹⁷ die Überprüfung der Nutzbarkeit der Praxisräume durch das Vorgehen der Eignungsprüfung des Gebäudetopologiemodells für die Nutzungsfälle durch anschauliche Simulation der Gebäudenutzung. Begonnen wird mit der Prüfung der Nutzung aus den Nutzungsfällen 1 bis 3. Hierzu wird die Gebäudenutzung im Modell mit vier Ärzten, zahnmedizinischen Assistenten und drei Patienten exemplarisch simuliert. Abbildung 88 zeigt die zugehörige Spezifikation für die Initiierung der Gebäudenutzung. In dieser Spezifikation werden zunächst die den verschiedenen Räumen zugeordneten gemeinsamen Funktionsnutzungsangebote mit den beteiligten Rollen definiert. Die Erzeugung der Nutzungsfälle erfolgt im Anschluss aufgrund der *Usecase Specification*.⁹⁸

Die Beobachtung der Simulation und die genauere Inspektion zeigt, dass die Netze der Nutzungsfälle 1 und 2 nicht vollständig durchlaufen werden, insbesondere werden keine Behandlungsräume aufgesucht, da die geforderte Funktion des Umkleidens nicht genutzt werden kann. Ursache ist ein fehlender Personalraum, der eine Umkleidemöglichkeit bietet. Es wird u. a. der Hörtestraum betreten, der aber diese Funktion nicht anbietet. In den Abbildungen 89 und 90 wird je ein Zustand aus der Simulation für die Nutzungsfälle 1 bzw. 2 gezeigt.

97 Es wird auf die Beschreibung zu Beginn von 6.2 verwiesen.

98 Eine detaillierte Erläuterung der Initiierung der Gebäudenutzung ist am Ende des Abschnitts 5.1.5 gegeben.

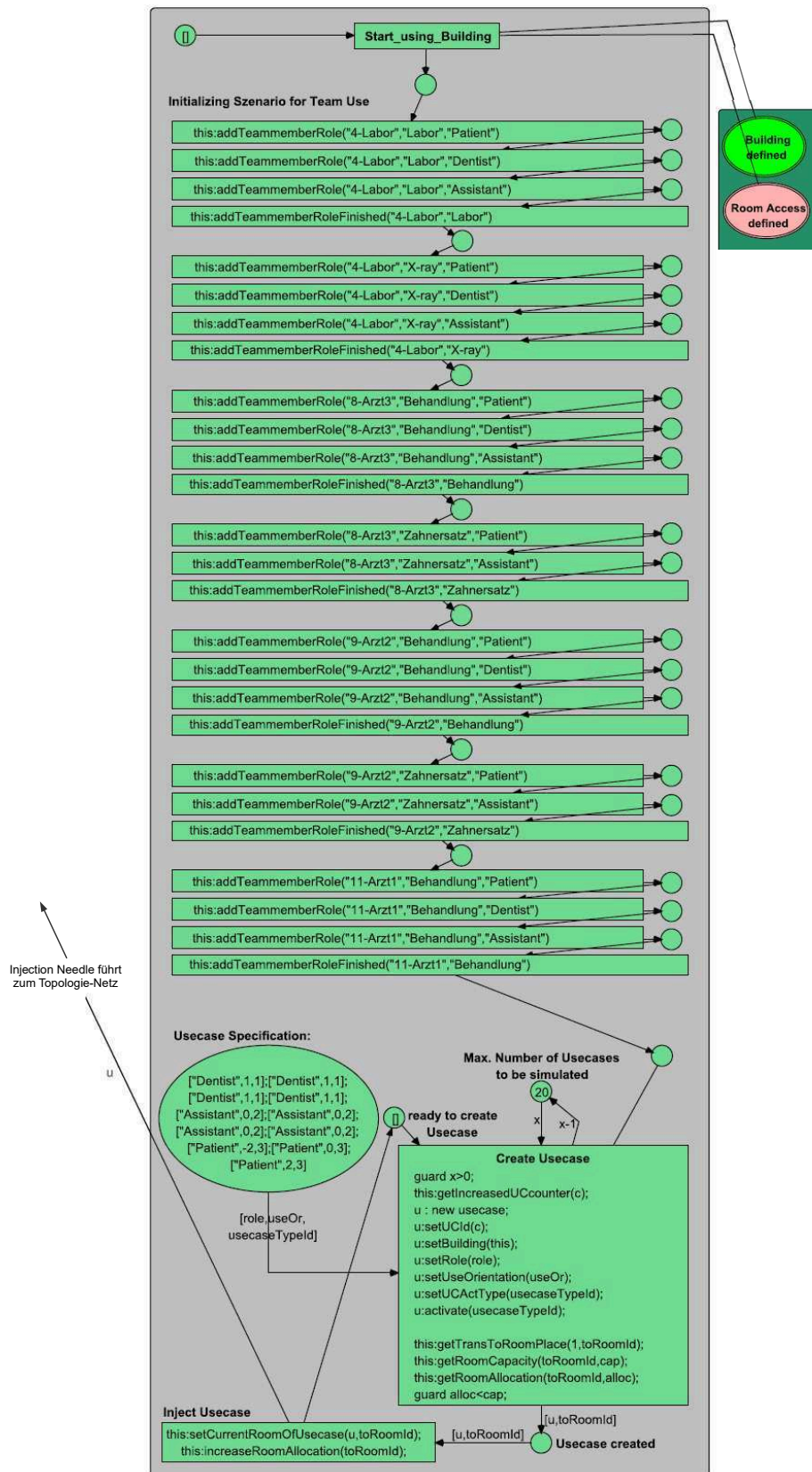


Abbildung 88: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Start der Gebäudenutzung für Nutzungsfälle 1–3

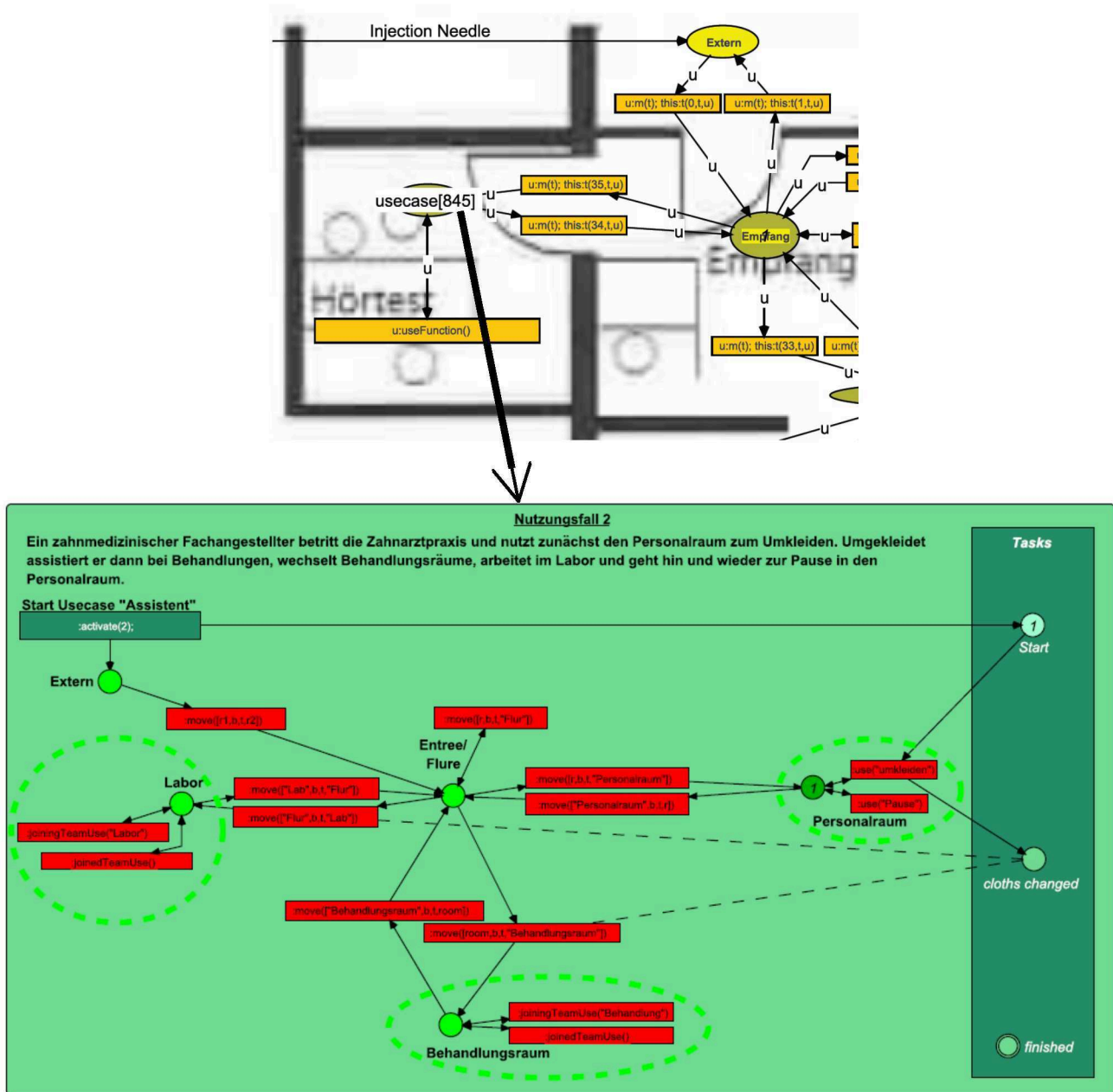


Abbildung 90: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Simulation Nutzungsfall 2 verhindert
 Quelle aus Abbildung 83: [Neufert 2016], S. 546, Ausschnitt, ergänzt durch Einzeichnen eines Topologie-Netzes

Bei Betrachtung der Gebäudetopologie und des Grundrisses besteht eine Lösung in der Umnutzung des Hörtestraums als Personalraum. Im Modell wird dies dadurch erreicht, dass der Raum-Stelle des Hörtestraums die Funktion des Umkleidens zugeordnet wird. Dies erfolgt im Spezifikationsnetz wie in Abbildung 91 dargestellt.

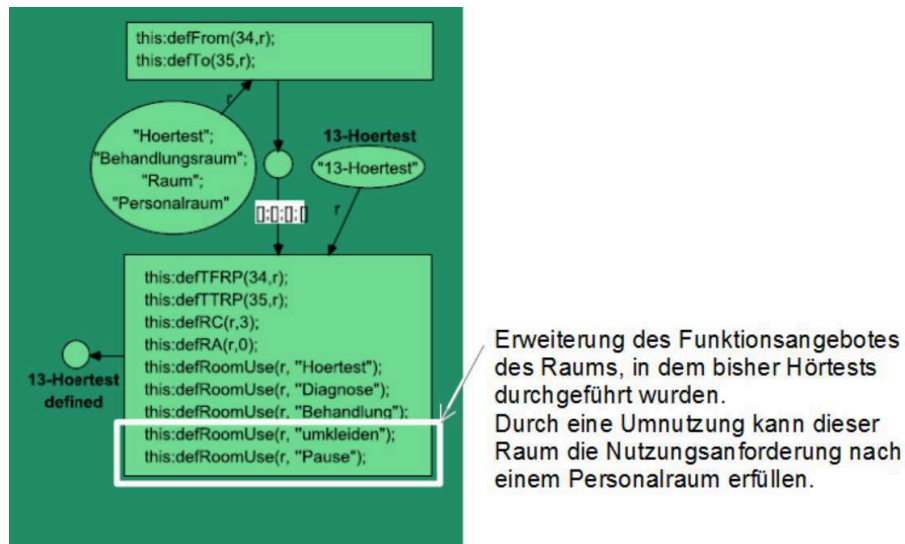


Abbildung 91: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Umnutzung Hörtestraum als Personalraum

Nach dieser Umnutzung ist eine Nutzung gemäß den Anforderungen der Nutzungsfälle 1 bis 3 möglich. Nutzungsfall 3 ist so spezifiziert, dass bei Verlassen der Praxis der Nutzungsfall als abgeschlossen gilt und eine entsprechende Markierung der Task-Stelle *finished* erfolgt. Infolgedessen erzeugt das Metamodell eine Datei des Nutzungsprotokolls.⁹⁹ Die Abbildungen 92 bis 94 zeigen die Nutzungsprotokolle, jeweils in der erzeugten Rohform und als aufbereitete Datei, in der die einzelnen Nutzungsschritte in sortierter Folge gemäß dem Nutzungsablauf dargestellt sind.¹⁰⁰

Dagegen sind die Nutzungsfälle 1 und 2 ohne Ende des Nutzungsablaufs definiert. Die Nutzbarkeit wird insbesondere anhand des abschließbaren Nutzungsablaufes der Rolle des Patienten bewertet. Eine andere Definition der Nutzungsfälle wäre auch möglich.

⁹⁹ Das Regelwerk *Save Use Recording* ist in 5.1.4 beschrieben.

¹⁰⁰ Die Rohform zeigt als Einträge die einzelnen Datensätze für jeden Nutzungsschritt, wobei die Reihenfolge der Einträge in der Datei durch den Nichtdeterminismus des erzeugenden Petrinetzes zufällig ist. Anhand der Nr. des Eintrags kann die tatsächlich erfolgte Nutzungsreihenfolge nachvollzogen werden. Die nicht deterministische Reihenfolge der in die Datei geschriebenen Einträge führt zu einer nicht direkt gut lesbaren, wenn auch vollständigen Aufzählung. Mit einem gängigen Tabellenkalkulationsprogramm lässt sich sehr einfach diese Rohdatei umwandeln in eine sortierte Darstellung der Datensätze. Hier wurde Apache OpenOffice Calc [OpenOffice 2017] verwendet.

Rohdatei:

22, 1, 3, Patient, 2, Transition: 31, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
 3, 1, 3, Patient, 2, Transition: 27, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
 35, 1, 3, Patient, 2, Transition: 33, [1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
 5, 1, 3, Patient, 2, Transition: 27, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
 9, 1, 3, Patient, 2, Function: Garderobe
 33, 1, 3, Patient, 2, Transition: 30, [12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
 37, 1, 3, Patient, 2, Transition: 30, [12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
 Nr, Usecase, Act.-Type, Role, Use-Or., Use, Specification1, Specification2
 10, 1, 3, Patient, 2, Transition: 30, [12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
 12, 1, 3, Patient, 2, Transition: 26, [7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
 0, 1, 3, Patient, 2, Transition: 0, [01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
 36, 1, 3, Patient, 2, Transition: 31, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
 38, 1, 3, Patient, 2, Transition: 32, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
 8, 1, 3, Patient, 2, Function: warten
 18, 1, 3, Patient, 2, Transition: 33, [1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
 7, 1, 3, Patient, 2, Transition: 31, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
 39, 1, 3, Patient, 2, Transition: 1, [1-Entree,Barrierefrei,Tür,01-Extern]
 29, 1, 3, Patient, 2, Transition: 30, [12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
 13, 1, 3, Patient, 2, Transition: 25, [10-Flur4,Barrierefrei,Tür,11-Arzt1]
 17, 1, 3, Patient, 2, Function: Termin
 32, 1, 3, Patient, 2, Transition: 31, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
 1, 1, 3, Patient, 2, Function: Empfang
 4, 1, 3, Patient, 2, Transition: 26, [7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
 16, 1, 3, Patient, 2, Transition: 32, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
 19, 1, 3, Patient, 2, Transition: 31, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
 26, 1, 3, Patient, 2, Transition: 31, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
 14, 1, 3, Patient, 2, Function: Behandlung
 24, 1, 3, Patient, 2, Transition: 31, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
 25, 1, 3, Patient, 2, Transition: 30, [12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
 27, 1, 3, Patient, 2, Transition: 30, [12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
 28, 1, 3, Patient, 2, Transition: 31, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
 21, 1, 3, Patient, 2, Transition: 30, [12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
 34, 1, 3, Patient, 2, Transition: 32, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
 31, 1, 3, Patient, 2, Transition: 30, [12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
 30, 1, 3, Patient, 2, Transition: 31, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
 20, 1, 3, Patient, 2, Function: Garderobe
 15, 1, 3, Patient, 2, Transition: 24, [11-Arzt1,Barrierefrei,Tür,10-Flur4]
 2, 1, 3, Patient, 2, Transition: 33, [1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
 23, 1, 3, Patient, 2, Transition: 30, [12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
 6, 1, 3, Patient, 2, Transition: 26, [7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
 11, 1, 3, Patient, 2, Transition: 27, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]

Aufbereitete Datei:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Nr	Usecase	Act.-Type	Role	Use-Or.	Use	Specification1	Specification2
2	0	1	3	Patient	2	Transition: 0		[01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
3	1	1	3	Patient	2	Function: Empfang		
4	2	1	3	Patient	2	Transition: 33		[1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
5	3	1	3	Patient	2	Transition: 27		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
6	4	1	3	Patient	2	Transition: 26		[7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
7	5	1	3	Patient	2	Transition: 27		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
8	6	1	3	Patient	2	Transition: 26		[7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
9	7	1	3	Patient	2	Transition: 31		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
10	8	1	3	Patient	2	Function: warten		
11	9	1	3	Patient	2	Function: Garderobe		
12	10	1	3	Patient	2	Transition: 30		[12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
13	11	1	3	Patient	2	Transition: 27		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
14	12	1	3	Patient	2	Transition: 26		[7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
15	13	1	3	Patient	2	Transition: 25		[10-Flur4,Barrierefrei,Tür,11-Arzt1]
16	14	1	3	Patient	2	Function: Behandlung		
17	15	1	3	Patient	2	Transition: 24		[11-Arzt1,Barrierefrei,Tür,10-Flur4]
18	16	1	3	Patient	2	Transition: 32		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
19	17	1	3	Patient	2	Function: Termin		
20	18	1	3	Patient	2	Transition: 33		[1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
21	19	1	3	Patient	2	Transition: 31		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
22	20	1	3	Patient	2	Function: Garderobe		
23	21	1	3	Patient	2	Transition: 30		[12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
24	22	1	3	Patient	2	Transition: 31		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
25	23	1	3	Patient	2	Transition: 30		[12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
26	24	1	3	Patient	2	Transition: 31		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
27	25	1	3	Patient	2	Transition: 30		[12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
28	26	1	3	Patient	2	Transition: 31		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
29	27	1	3	Patient	2	Transition: 30		[12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
30	28	1	3	Patient	2	Transition: 31		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
31	29	1	3	Patient	2	Transition: 30		[12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
32	30	1	3	Patient	2	Transition: 31		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
33	31	1	3	Patient	2	Transition: 30		[12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
34	32	1	3	Patient	2	Transition: 31		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
35	33	1	3	Patient	2	Transition: 30		[12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
36	34	1	3	Patient	2	Transition: 32		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
37	35	1	3	Patient	2	Transition: 33		[1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
38	36	1	3	Patient	2	Transition: 31		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
39	37	1	3	Patient	2	Transition: 30		[12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
40	38	1	3	Patient	2	Transition: 32		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
41	39	1	3	Patient	2	Transition: 1		[1-Entree,Barrierefrei,Tür,01-Extern]

Abbildung 92: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Nutzungsfall 3, Patient 1, Simulationsergebnis der Nutzungsfälle 1–3

Rohdatei:

```

12, 2, 3, Patient, -2, Transition: 32, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
17, 2, 3, Patient, -2, Transition: 26, [7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
16, 2, 3, Patient, -2, Transition: 27, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
25, 2, 3, Patient, -2, Transition: 32, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
13, 2, 3, Patient, -2, Transition: 33, [1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
6, 2, 3, Patient, -2, Transition: 30, [12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
9, 2, 3, Patient, -2, Function: Behandlung
4, 2, 3, Patient, -2, Function: warten
39, 2, 3, Patient, -2, Transition: 1, [1-Entree,Barrierefrei,Tür,01-Extern]
26, 2, 3, Patient, -2, Transition: 33, [1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
19, 2, 3, Patient, -2, Function: Termin
31, 2, 3, Patient, -2, Transition: 31, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
18, 2, 3, Patient, -2, Transition: 32, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
22, 2, 3, Patient, -2, Transition: 26, [7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
29, 2, 3, Patient, -2, Transition: 32, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
37, 2, 3, Patient, -2, Transition: 30, [12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
24, 2, 3, Patient, -2, Transition: 30, [12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
38, 2, 3, Patient, -2, Transition: 32, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
32, 2, 3, Patient, -2, Transition: 30, [12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
23, 2, 3, Patient, -2, Transition: 31, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
0, 2, 3, Patient, -2, Transition: 0, [01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
5, 2, 3, Patient, -2, Function: Garderobe
Nr, Usecase, Act.-Type, Role, Use-Or., Use, Specification1, Specification2
14, 2, 3, Patient, -2, Transition: 32, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
11, 2, 3, Patient, -2, Transition: 26, [7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
27, 2, 3, Patient, -2, Transition: 32, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
34, 2, 3, Patient, -2, Transition: 26, [7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
33, 2, 3, Patient, -2, Transition: 27, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
7, 2, 3, Patient, -2, Transition: 27, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
36, 2, 3, Patient, -2, Function: Garderobe
3, 2, 3, Patient, -2, Transition: 31, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
21, 2, 3, Patient, -2, Transition: 27, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
15, 2, 3, Patient, -2, Transition: 33, [1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
10, 2, 3, Patient, -2, Transition: 23, [9-Arzt2,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
30, 2, 3, Patient, -2, Transition: 33, [1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
20, 2, 3, Patient, -2, Transition: 33, [1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
8, 2, 3, Patient, -2, Transition: 22, [7-Flur3,Barrierefrei,Tür,9-Arzt2]
1, 2, 3, Patient, -2, Function: Empfang
35, 2, 3, Patient, -2, Transition: 31, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
28, 2, 3, Patient, -2, Transition: 33, [1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
2, 2, 3, Patient, -2, Transition: 33, [1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]

```

Aufbereitete Datei:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Nr	Usecase	Act.-Type	Role	Use-Or.	Use	Specification1	Specification2
2	0	2	3	Patient	-2	Transition: 0		[01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
3	1	2	3	Patient	-2	Function: Empfang		
4	2	2	3	Patient	-2	Transition: 33		[1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
5	3	2	3	Patient	-2	Transition: 31		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
6	4	2	3	Patient	-2	Function: warten		
7	5	2	3	Patient	-2	Function: Garderobe		
8	6	2	3	Patient	-2	Transition: 30		[12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
9	7	2	3	Patient	-2	Transition: 27		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
10	8	2	3	Patient	-2	Transition: 22		[7-Flur3,Barrierefrei,Tür,9-Arzt2]
11	9	2	3	Patient	-2	Function: Behandlung		
12	10	2	3	Patient	-2	Transition: 23		[9-Arzt2,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
13	11	2	3	Patient	-2	Transition: 26		[7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
14	12	2	3	Patient	-2	Transition: 32		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
15	13	2	3	Patient	-2	Transition: 33		[1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
16	14	2	3	Patient	-2	Transition: 32		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
17	15	2	3	Patient	-2	Transition: 33		[1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
18	16	2	3	Patient	-2	Transition: 27		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
19	17	2	3	Patient	-2	Transition: 26		[7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
20	18	2	3	Patient	-2	Transition: 32		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
21	19	2	3	Patient	-2	Function: Termin		
22	20	2	3	Patient	-2	Transition: 33		[1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
23	21	2	3	Patient	-2	Transition: 27		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
24	22	2	3	Patient	-2	Transition: 26		[7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
25	23	2	3	Patient	-2	Transition: 31		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
26	24	2	3	Patient	-2	Transition: 30		[12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
27	25	2	3	Patient	-2	Transition: 32		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
28	26	2	3	Patient	-2	Transition: 33		[1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
29	27	2	3	Patient	-2	Transition: 32		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
30	28	2	3	Patient	-2	Transition: 33		[1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
31	29	2	3	Patient	-2	Transition: 32		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
32	30	2	3	Patient	-2	Transition: 33		[1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
33	31	2	3	Patient	-2	Transition: 31		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
34	32	2	3	Patient	-2	Transition: 30		[12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
35	33	2	3	Patient	-2	Transition: 27		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
36	34	2	3	Patient	-2	Transition: 26		[7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
37	35	2	3	Patient	-2	Transition: 31		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
38	36	2	3	Patient	-2	Function: Garderobe		
39	37	2	3	Patient	-2	Transition: 30		[12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
40	38	2	3	Patient	-2	Transition: 32		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
41	39	2	3	Patient	-2	Transition: 1		[1-Entree,Barrierefrei,Tür,01-Extern]

Abbildung 93: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Nutzungsfall 3, Patient 2, Simulationsergebnis der Nutzungsfälle 1–3

Rohdatei:

```

20, 3, 3, Patient, 0, Transition: 32, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
3, 3, 3, Patient, 0, Transition: 27, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
0, 3, 3, Patient, 0, Transition: 0, [01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
12, 3, 3, Patient, 0, Transition: 26, [7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
5, 3, 3, Patient, 0, Transition: 31, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
7, 3, 3, Patient, 0, Transition: 30, [12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
Nr, Usecase, Act.-Type, Role, Use-Or., Use, Specification1, Specification2
17, 3, 3, Patient, 0, Transition: 26, [7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
21, 3, 3, Patient, 0, Transition: 1, [1-Entree,Barrierefrei,Tür,01-Extern]
13, 3, 3, Patient, 0, Transition: 32, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
11, 3, 3, Patient, 0, Transition: 19, [8-Arzt3,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
1, 3, 3, Patient, 0, Function: Empfang
2, 3, 3, Patient, 0, Transition: 33, [1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
8, 3, 3, Patient, 0, Transition: 27, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
16, 3, 3, Patient, 0, Transition: 27, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
6, 3, 3, Patient, 0, Function: warten
10, 3, 3, Patient, 0, Function: Behandlung
4, 3, 3, Patient, 0, Transition: 26, [7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
19, 3, 3, Patient, 0, Transition: 33, [1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
14, 3, 3, Patient, 0, Function: Termin
15, 3, 3, Patient, 0, Transition: 33, [1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
18, 3, 3, Patient, 0, Transition: 32, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
9, 3, 3, Patient, 0, Transition: 18, [7-Flur3,Barrierefrei,Tür,8-Arzt3]

```

Aufbereitete Datei:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Nr	Usecase	Act.-Type	Role	Use-Or.	Use	Specification1	Specification2
2	0	3	3	Patient	0	Transition: 0		[01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
3	1	3	3	Patient	0	Function: Empfang		
4	2	3	3	Patient	0	Transition: 33		[1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
5	3	3	3	Patient	0	Transition: 27		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
6	4	3	3	Patient	0	Transition: 26		[7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
7	5	3	3	Patient	0	Transition: 31		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,12-warten]
8	6	3	3	Patient	0	Function: warten		
9	7	3	3	Patient	0	Transition: 30		[12-warten,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
10	8	3	3	Patient	0	Transition: 27		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
11	9	3	3	Patient	0	Transition: 18		[7-Flur3,Barrierefrei,Tür,8-Arzt3]
12	10	3	3	Patient	0	Function: Behandlung		
13	11	3	3	Patient	0	Transition: 19		[8-Arzt3,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
14	12	3	3	Patient	0	Transition: 26		[7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
15	13	3	3	Patient	0	Transition: 32		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
16	14	3	3	Patient	0	Function: Termin		
17	15	3	3	Patient	0	Transition: 33		[1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
18	16	3	3	Patient	0	Transition: 27		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
19	17	3	3	Patient	0	Transition: 26		[7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
20	18	3	3	Patient	0	Transition: 32		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
21	19	3	3	Patient	0	Transition: 33		[1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
22	20	3	3	Patient	0	Transition: 32		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,1-Entree]
23	21	3	3	Patient	0	Transition: 1		[1-Entree,Barrierefrei,Tür,01-Extern]

Abbildung 94: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Nutzungsfall 3, Patient 3, Simulationsergebnis der Nutzungsfälle 1–3

Eine weitere Nutzungsanforderung wird durch den Nutzungsfall 4 spezifiziert. Zur Prüfung wird die in Abbildung 95 ausschnittsweise dargestellte Initiierung definiert. Hier wird ein Nutzungsfall für die Rolle des Patienten und den Nutzungsfalltyp 4 erzeugt. Die Simulation zeigt, dass gemäß des Nutzungsfalls eine Bewegung in den Praxisräumen stattfindet, der WC-Raum durch das Labor aber nicht betreten wird. Eine Betrachtung der beiden Räume im Spezifikationsnetz zeigt, dass der Rolle des Patienten ein Zutritt zum Labor nicht erlaubt ist. Das „gefangene“ WC kann daher nicht erreicht werden. In Abbildung 96 ist die relevante Raumübergangstransition im Topologie-Netz markiert, die für den Patienten den Zugang zum Labor verhindert.

Zur Lösung muss ohne Umbaumaßnahme der Zugang zum Labor für Patienten erlaubt werden. Im Modell ist dies einfach möglich wie in Abbildung 97 gezeigt wird. In der Realität kann das gegen die Vorschriften des Arztpraxisbetriebs verstoßen. Daher ist ein Umbau des Zugangs zum WC in Erwägung zu ziehen.

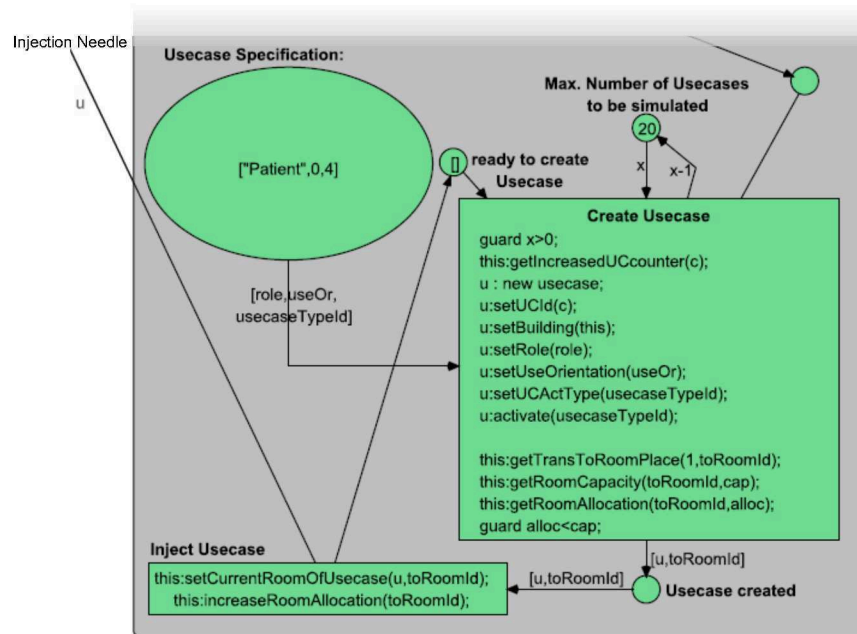


Abbildung 95: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Start der Gebäudenutzung für den Nutzungsfall 4

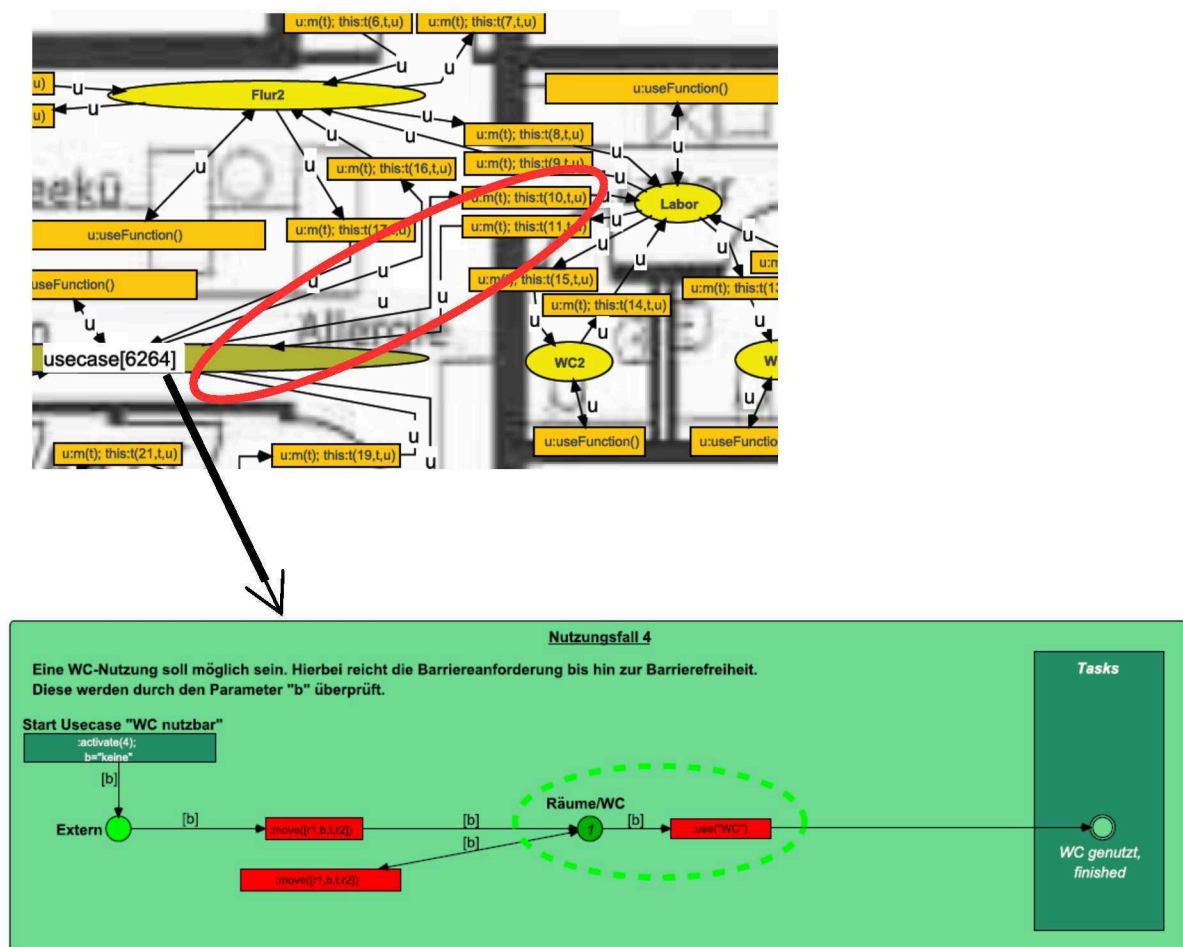


Abbildung 96: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Simulation Nutzungsfall 4 verhindert Quelle aus Abbildung 83: [Neufert 2016], S. 546, Ausschnitt, ergänzt durch Einzeichnen eines Topologie-Netzes

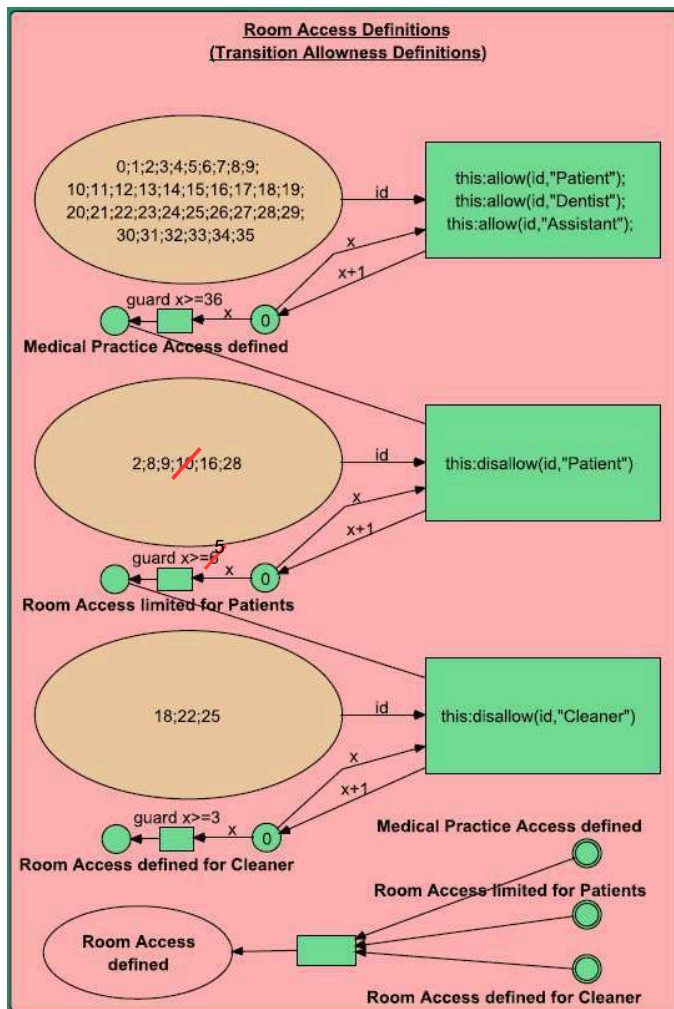


Abbildung 97: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Nutzungsfall 4, Zugangsberechtigung

Nach dieser Änderung der Zugangsberechtigung im Modell zeigt die erneute Simulation, dass das WC erreicht und genutzt werden kann. Die Abbildung 98 zeigt ein Nutzungsprotokoll. Der soeben geprüfte Nutzungsfall stellt keine Anforderung an die Barrieren der Raumübergänge. Bei einer Prüfung mit dem veränderten Parameter b für eine barrierefreie Bewegung zeigt die Simulation, wie in Abbildung 99 im Nutzungsprotokoll markiert, dass das Labor zwar mehrfach erreicht wird, nie aber der Übergang in den WC-Raum erfolgt. Bei Betrachtung der Spezifikation der Barrieredefinition des Raumübergangs zum WC-Raum wird ersichtlich, dass dieser als für maximal einfach gehbehinderte Personen geeignet spezifiziert ist. Auch hier ist eine Änderung des Modells die Lösung, wobei der Zugang zu dem WC-Raum mit der Barriereangabe für Rollstuhlleistung definiert wird. Abbildung 100 zeigt diese Änderung. Eine erneute Simulation zeigt die Nutzbarkeit gemäß des Nutzungsfalls 4, wie in Abbildung 101 gezeigt und im Protokoll in Abbildung 102 dokumentiert.

Die beiden Anforderungen an den Zugang zum WC-Raum, d. h. die Zugangsberechtigung für Patienten und die Barriereanforderung, legen eine Umbaumaßnahme für diesen Zugang nahe. Die Raumgröße muss entsprechend für eine Rollstuhlleistung ausgelegt werden.

Rohdatei:

```

42, 1, 4, Patient, 0, Transition: 11, [4-Labor,keine,Durchgang,7-Flur3]
23, 1, 4, Patient, 0, Transition: 30, [12-warten,keine,Durchgang,10-Flur4]
13, 1, 4, Patient, 0, Transition: 35, [1-Entree,keine,Tür,13-Hoertest]
36, 1, 4, Patient, 0, Transition: 18, [7-Flur3,keine,Tür,8-Arzt3]
40, 1, 4, Patient, 0, Transition: 23, [9-Arzt2,keine,Tür,7-Flur3]
28, 1, 4, Patient, 0, Transition: 27, [10-Flur4,keine,Durchgang,7-Flur3]
20, 1, 4, Patient, 0, Transition: 25, [10-Flur4,keine,Tür,11-Arzt1]
31, 1, 4, Patient, 0, Transition: 30, [12-warten,keine,Durchgang,10-Flur4]
11, 1, 4, Patient, 0, Transition: 24, [11-Arzt1,keine,Tür,10-Flur4]
38, 1, 4, Patient, 0, Transition: 21, [9-Arzt2,keine,Tür,8-Arzt3]
32, 1, 4, Patient, 0, Transition: 27, [10-Flur4,keine,Durchgang,7-Flur3]
19, 1, 4, Patient, 0, Transition: 33, [1-Entree,keine,Durchgang,10-Flur4]
15, 1, 4, Patient, 0, Transition: 1, [1-Entree,keine,Tür,01-Extern]
22, 1, 4, Patient, 0, Transition: 31, [10-Flur4,keine,Durchgang,12-warten]
43, 1, 4, Patient, 0, Transition: 10, [7-Flur3,keine,Durchgang,4-Labor]
30, 1, 4, Patient, 0, Transition: 31, [10-Flur4,keine,Durchgang,12-warten]
21, 1, 4, Patient, 0, Transition: 24, [11-Arzt1,keine,Tür,10-Flur4]
7, 1, 4, Patient, 0, Transition: 33, [1-Entree,keine,Durchgang,10-Flur4]
24, 1, 4, Patient, 0, Transition: 31, [10-Flur4,keine,Durchgang,12-warten]
10, 1, 4, Patient, 0, Transition: 25, [10-Flur4,keine,Tür,11-Arzt1]
3, 1, 4, Patient, 0, Transition: 1, [1-Entree,keine,Tür,01-Extern]
4, 1, 4, Patient, 0, Transition: 0, [01-Extern,keine,Tür,1-Entree]
5, 1, 4, Patient, 0, Transition: 1, [1-Entree,keine,Tür,01-Extern]
8, 1, 4, Patient, 0, Transition: 25, [10-Flur4,keine,Tür,11-Arzt1]
1, 1, 4, Patient, 0, Transition: 1, [1-Entree,keine,Tür,01-Extern]
27, 1, 4, Patient, 0, Transition: 24, [11-Arzt1,keine,Tür,10-Flur4]
2, 1, 4, Patient, 0, Transition: 0, [01-Extern,keine,Tür,1-Entree]
17, 1, 4, Patient, 0, Transition: 33, [1-Entree,keine,Durchgang,10-Flur4]
47, 1, 4, Patient, 0, Function: WC
Nr, Usecase, Act.-Type, Role, Use-Or., Use, Specification1, Specification2
35, 1, 4, Patient, 0, Transition: 19, [8-Arzt3,keine,Tür,7-Flur3]
14, 1, 4, Patient, 0, Transition: 34, [13-Hoertest,keine,Tür,1-Entree]
37, 1, 4, Patient, 0, Transition: 20, [8-Arzt3,keine,Tür,9-Arzt2]
34, 1, 4, Patient, 0, Transition: 21, [9-Arzt2,keine,Tür,8-Arzt3]
6, 1, 4, Patient, 0, Transition: 0, [01-Extern,keine,Tür,1-Entree]
39, 1, 4, Patient, 0, Transition: 20, [8-Arzt3,keine,Tür,9-Arzt2]
12, 1, 4, Patient, 0, Transition: 32, [10-Flur4,keine,Durchgang,1-Entree]
16, 1, 4, Patient, 0, Transition: 0, [01-Extern,keine,Tür,1-Entree]
29, 1, 4, Patient, 0, Transition: 26, [7-Flur3,keine,Durchgang,10-Flur4]
25, 1, 4, Patient, 0, Transition: 30, [12-warten,keine,Durchgang,10-Flur4]
41, 1, 4, Patient, 0, Transition: 10, [7-Flur3,keine,Durchgang,4-Labor]
44, 1, 4, Patient, 0, Transition: 13, [4-Labor,keine,Tür,5-WC1]
46, 1, 4, Patient, 0, Transition: 13, [4-Labor,keine,Tür,5-WC1]
18, 1, 4, Patient, 0, Transition: 32, [10-Flur4,keine,Durchgang,1-Entree]
9, 1, 4, Patient, 0, Transition: 24, [11-Arzt1,keine,Tür,10-Flur4]
0, 1, 4, Patient, 0, Transition: 0, [01-Extern,keine,Tür,1-Entree]
26, 1, 4, Patient, 0, Transition: 25, [10-Flur4,keine,Tür,11-Arzt1]
45, 1, 4, Patient, 0, Transition: 12, [5-WC1,keine,Tür,4-Labor]
33, 1, 4, Patient, 0, Transition: 22, [7-Flur3,keine,Tür,9-Arzt2]

```

Aufbereitete Datei:

	A	B	C	D	E	F	G	H
	Nr	Usecase	Act.-Type	Role	Use-Or.	Use	Specification1	Specification2
1	0	1	4	Patient	0	Transition: 0		[01-Extern,keine,Tür,1-Entree]
2	1	1	4	Patient	0	Transition: 1		[1-Entree,keine,Tür,01-Extern]
3	2	1	4	Patient	0	Transition: 0		[01-Extern,keine,Tür,1-Entree]
4	3	1	4	Patient	0	Transition: 1		[1-Entree,keine,Tür,01-Extern]
5	4	1	4	Patient	0	Transition: 0		[01-Extern,keine,Tür,1-Entree]
6	5	1	4	Patient	0	Transition: 1		[1-Entree,keine,Tür,01-Extern]
7	6	1	4	Patient	0	Transition: 0		[01-Extern,keine,Tür,1-Entree]
8	7	1	4	Patient	0	Transition: 33		[1-Entree,keine,Durchgang,10-Flur4]
9	8	1	4	Patient	0	Transition: 25		[10-Flur4,keine,Tür,11-Arzt1]
10	9	1	4	Patient	0	Transition: 24		[11-Arzt1,keine,Tür,10-Flur4]
11	10	1	4	Patient	0	Transition: 26		[10-Flur4,keine,Tür,11-Arzt1]
12	11	1	4	Patient	0	Transition: 24		[11-Arzt1,keine,Tür,10-Flur4]
13	12	1	4	Patient	0	Transition: 32		[10-Flur4,keine,Durchgang,1-Entree]
14	13	1	4	Patient	0	Transition: 35		[1-Entree,keine,Tür,13-Hoertest]
15	14	1	4	Patient	0	Transition: 34		[13-Hoertest,keine,Tür,1-Entree]
16	15	1	4	Patient	0	Transition: 1		[1-Entree,keine,Tür,01-Extern]
17	16	1	4	Patient	0	Transition: 0		[01-Extern,keine,Tür,1-Entree]
18	17	1	4	Patient	0	Transition: 33		[1-Entree,keine,Durchgang,10-Flur4]
19	18	1	4	Patient	0	Transition: 32		[10-Flur4,keine,Durchgang,1-Entree]
20	19	1	4	Patient	0	Transition: 33		[1-Entree,keine,Durchgang,10-Flur4]
21	20	1	4	Patient	0	Transition: 25		[10-Flur4,keine,Tür,11-Arzt1]
22	21	1	4	Patient	0	Transition: 24		[11-Arzt1,keine,Tür,10-Flur4]
23	22	1	4	Patient	0	Transition: 31		[10-Flur4,keine,Durchgang,12-warten]
24	23	1	4	Patient	0	Transition: 30		[12-warten,keine,Durchgang,10-Flur4]
25	24	1	4	Patient	0	Transition: 31		[10-Flur4,keine,Durchgang,12-warten]
26	25	1	4	Patient	0	Transition: 30		[12-warten,keine,Durchgang,10-Flur4]
27	26	1	4	Patient	0	Transition: 25		[10-Flur4,keine,Tür,11-Arzt1]
28	27	1	4	Patient	0	Transition: 24		[11-Arzt1,keine,Tür,10-Flur4]
29	28	1	4	Patient	0	Transition: 27		[10-Flur4,keine,Durchgang,7-Flur3]
30	29	1	4	Patient	0	Transition: 26		[7-Flur3,keine,Durchgang,10-Flur4]
31	30	1	4	Patient	0	Transition: 31		[10-Flur4,keine,Durchgang,12-warten]
32	31	1	4	Patient	0	Transition: 30		[12-warten,keine,Durchgang,10-Flur4]
33	32	1	4	Patient	0	Transition: 27		[10-Flur4,keine,Durchgang,7-Flur3]
34	33	1	4	Patient	0	Transition: 22		[7-Flur3,keine,Tür,9-Arzt2]
35	34	1	4	Patient	0	Transition: 21		[9-Arzt2,keine,Tür,8-Arzt3]
36	35	1	4	Patient	0	Transition: 19		[8-Arzt3,keine,Tür,7-Flur3]
37	36	1	4	Patient	0	Transition: 18		[7-Flur3,keine,Tür,8-Arzt3]
38	37	1	4	Patient	0	Transition: 20		[8-Arzt3,keine,Tür,9-Arzt2]
39	38	1	4	Patient	0	Transition: 21		[9-Arzt2,keine,Tür,8-Arzt3]
40	39	1	4	Patient	0	Transition: 20		[8-Arzt3,keine,Tür,9-Arzt2]
41	40	1	4	Patient	0	Transition: 23		[9-Arzt2,keine,Tür,7-Flur3]
42	41	1	4	Patient	0	Transition: 10		[7-Flur3,keine,Durchgang,4-Labor]
43	42	1	4	Patient	0	Transition: 11		[4-Labor,keine,Durchgang,7-Flur3]
44	43	1	4	Patient	0	Transition: 10		[7-Flur3,keine,Durchgang,4-Labor]
45	44	1	4	Patient	0	Transition: 13		[4-Labor,keine,Tür,5-WC1]
46	45	1	4	Patient	0	Transition: 12		[5-WC1,keine,Tür,4-Labor]
47	46	1	4	Patient	0	Transition: 13		[4-Labor,keine,Tür,5-WC1]
48	47	1	4	Patient	0	Function: WC		
49								

Abbildung 98: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Nutzungsfall 4, Simulationsergebnis: WC genutzt

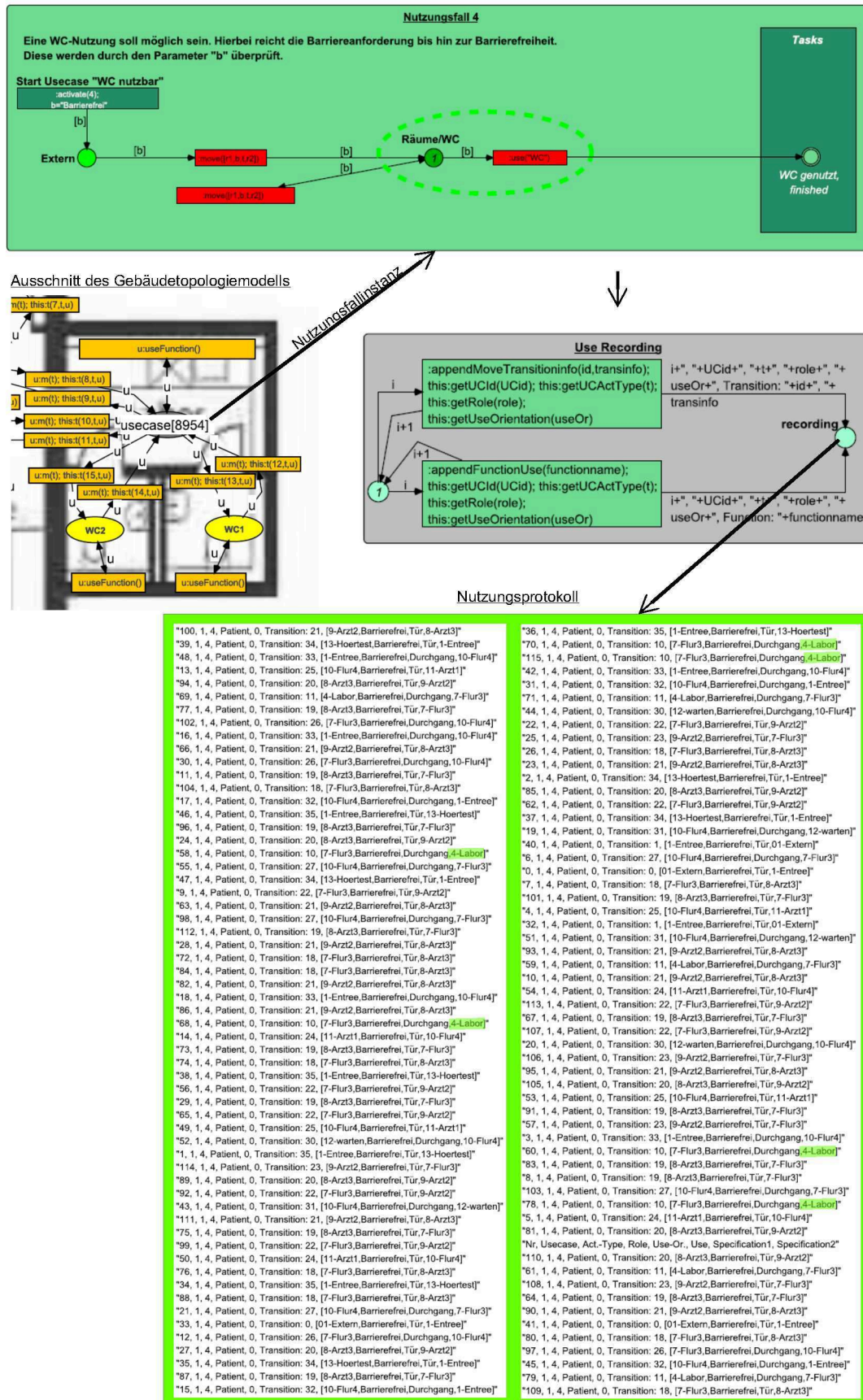


Abbildung 99: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Simulation Nutzungsfall 4 verhindert
Quelle aus Abbildung 83: [Neufert 2016], S. 546, Ausschnitt, ergänzt durch Einzeichnen eines Topologie-Netzes

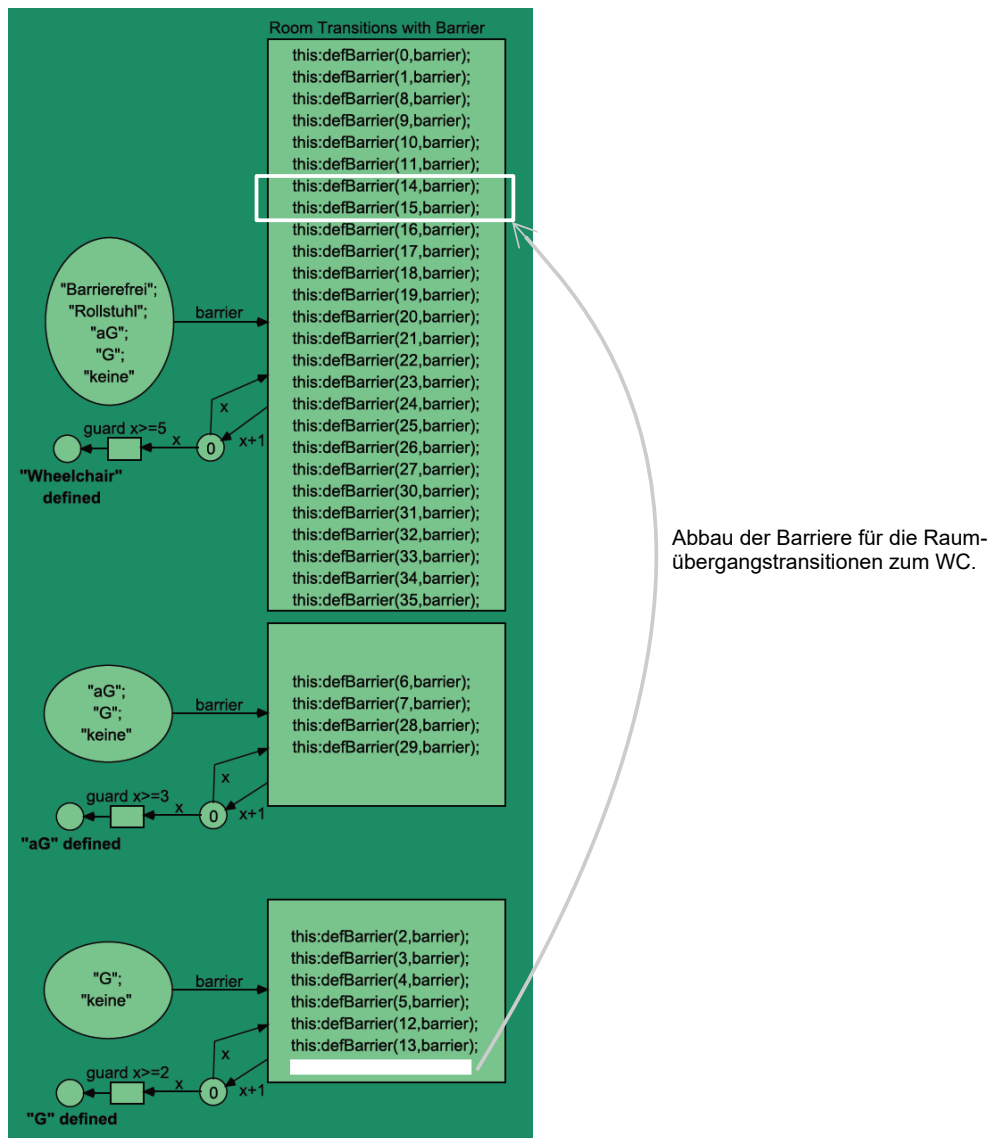


Abbildung 100: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Abbau der Barriere zum WC

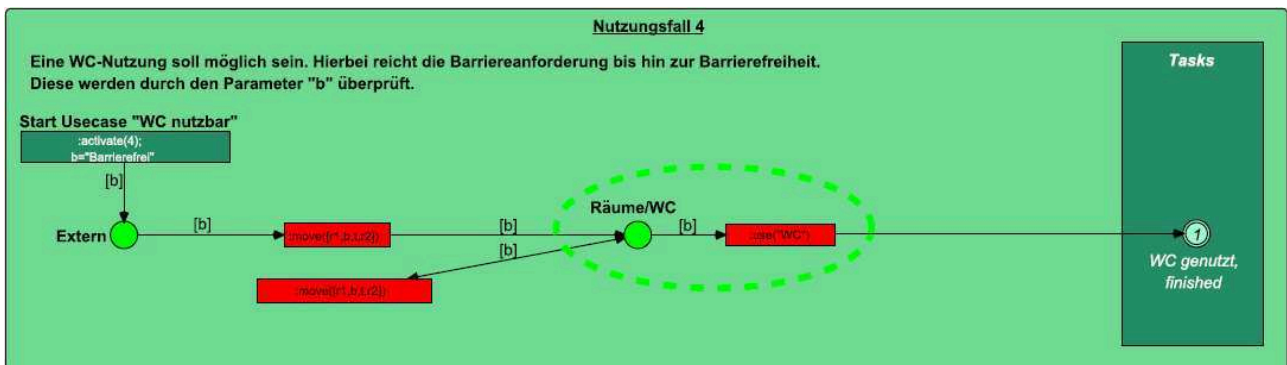


Abbildung 101: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Simulation Nutzungsfall 4: WC nutzbar

Rohdatei:

```

0, 1, 4, Patient, 0, Transition: 0, [01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
18, 1, 4, Patient, 0, Transition: 15, [4-Labor,Barrierefrei,Tür,6-WC2]
5, 1, 4, Patient, 0, Transition: 18, [7-Flur3,Barrierefrei,Tür,8-Arzt3]
1, 1, 4, Patient, 0, Transition: 1, [1-Entree,Barrierefrei,Tür,01-Extern]
19, 1, 4, Patient, 0, Function: WC
15, 1, 4, Patient, 0, Transition: 10, [7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,4-Labor]
17, 1, 4, Patient, 0, Transition: 14, [6-WC2,Barrierefrei,Tür,4-Labor]
13, 1, 4, Patient, 0, Transition: 20, [8-Arzt3,Barrierefrei,Tür,9-Arzt2]
11, 1, 4, Patient, 0, Transition: 19, [8-Arzt3,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
9, 1, 4, Patient, 0, Transition: 23, [9-Arzt2,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
2, 1, 4, Patient, 0, Transition: 0, [01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
16, 1, 4, Patient, 0, Transition: 15, [4-Labor,Barrierefrei,Tür,6-WC2]
8, 1, 4, Patient, 0, Transition: 20, [8-Arzt3,Barrierefrei,Tür,9-Arzt2]
3, 1, 4, Patient, 0, Transition: 33, [1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
10, 1, 4, Patient, 0, Transition: 18, [7-Flur3,Barrierefrei,Tür,8-Arzt3]
12, 1, 4, Patient, 0, Transition: 18, [7-Flur3,Barrierefrei,Tür,8-Arzt3]
4, 1, 4, Patient, 0, Transition: 27, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
6, 1, 4, Patient, 0, Transition: 19, [8-Arzt3,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
7, 1, 4, Patient, 0, Transition: 18, [7-Flur3,Barrierefrei,Tür,8-Arzt3]
Nr, Usecase, Act.-Type, Role, Use-Or., Use, Specification1, Specification2
14, 1, 4, Patient, 0, Transition: 23, [9-Arzt2,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]

```

Aufbereitete Datei:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Nr	Usecase	Act.-Type	Role	Use-Or.	Use	Specification1	Specification2
2	0	1	4	Patient	0	Transition: 0		[01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
3	1	1	4	Patient	0	Transition: 1		[1-Entree,Barrierefrei,Tür,01-Extern]
4	2	1	4	Patient	0	Transition: 0		[01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
5	3	1	4	Patient	0	Transition: 33		[1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
6	4	1	4	Patient	0	Transition: 27		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
7	5	1	4	Patient	0	Transition: 18		[7-Flur3,Barrierefrei,Tür,8-Arzt3]
8	6	1	4	Patient	0	Transition: 19		[8-Arzt3,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
9	7	1	4	Patient	0	Transition: 18		[7-Flur3,Barrierefrei,Tür,8-Arzt3]
10	8	1	4	Patient	0	Transition: 20		[8-Arzt3,Barrierefrei,Tür,9-Arzt2]
11	9	1	4	Patient	0	Transition: 23		[9-Arzt2,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
12	10	1	4	Patient	0	Transition: 18		[7-Flur3,Barrierefrei,Tür,8-Arzt3]
13	11	1	4	Patient	0	Transition: 19		[8-Arzt3,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
14	12	1	4	Patient	0	Transition: 18		[7-Flur3,Barrierefrei,Tür,8-Arzt3]
15	13	1	4	Patient	0	Transition: 20		[8-Arzt3,Barrierefrei,Tür,9-Arzt2]
16	14	1	4	Patient	0	Transition: 23		[9-Arzt2,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
17	15	1	4	Patient	0	Transition: 10		[7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,4-Labor]
18	16	1	4	Patient	0	Transition: 15		[4-Labor,Barrierefrei,Tür,6-WC2]
19	17	1	4	Patient	0	Transition: 14		[6-WC2,Barrierefrei,Tür,4-Labor]
20	18	1	4	Patient	0	Transition: 15		[4-Labor,Barrierefrei,Tür,6-WC2]
21	19	1	4	Patient	0	Function: WC		

Abbildung 102: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Nutzungsfall 4, Simulationsergebnis: WC nutzbar

Der Nutzungsfall 5 behandelt die gemeinsame Nutzung des Labors, etwa im Rahmen einer kieferorthopädischen Untersuchung inklusive Röntgenverfahren. Die Prüfung erfolgt wiederum durch Simulation nach deren Initiierung, wie in Abbildung 103 ausschnittsweise dargestellt. Wie spezifiziert, wird zusammen mit den Nutzungsfällen für Ärzte und zahnmedizinische Assistenten ein Nutzungsfall 5 mit der Rolle des Patienten in die Gebäudenutzung gegeben.

Simulationen zeigen, dass eine gemeinsame Nutzung im Labor nicht stattfindet. In den Abbildungen 104 und 105 ist eine Simulation in einem Zustand gezeigt, in dem alle Ärzte und Assistenten in Behandlungsräumen und dem Labor auf die jeweils gemeinsame Nutzung, d. h. eine Behandlung oder Labornutzung, warten, während der Patient keinen Zugang zum Labor erreicht. Das Protokoll dieser — im Vergleich zur weiteren durchgeführten — kurzen Simulation zeigt dies im Detail. Der Fall, dass der Patient nicht in das Labor findet, ist nur eine Variante. In weiteren Simulationen kommen auch andere Rollenkonstellationen zustande, etwa, dass Arzt und Patient, nicht aber der Assistent ins Labor finden. Die Betrachtung der Spezifikation des Labors zeigt, dass die Raumkapazität des Labors für zwei Personen festgelegt ist. Daher ist der Abdruck der weiteren Simulationsprotokolle dieses Beispiels nicht weiter hilfreich.

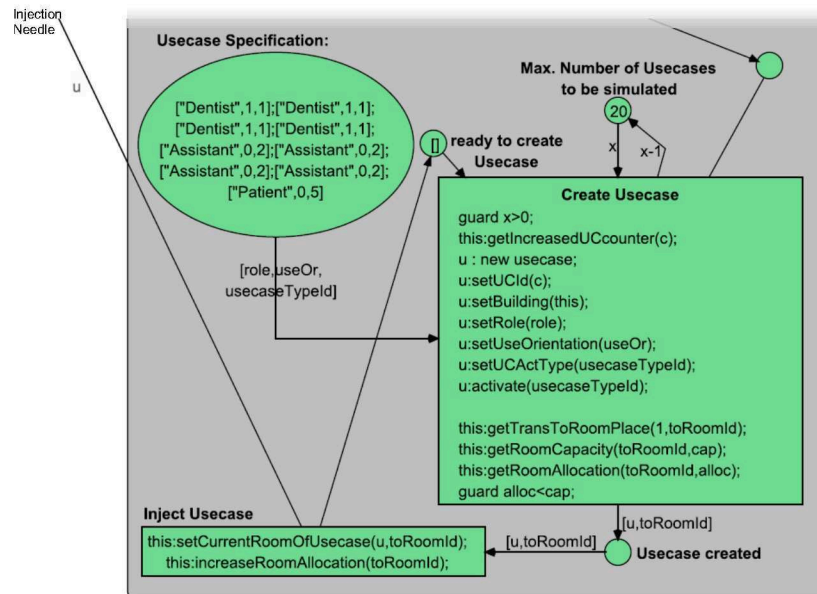
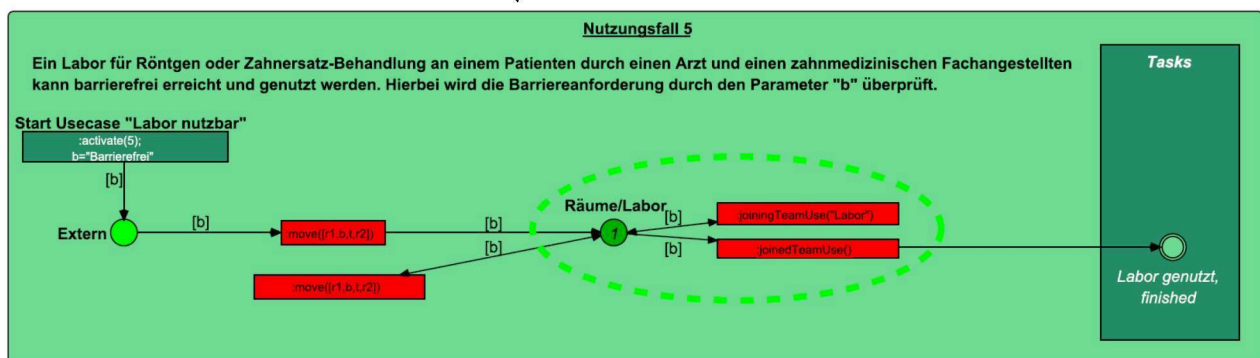
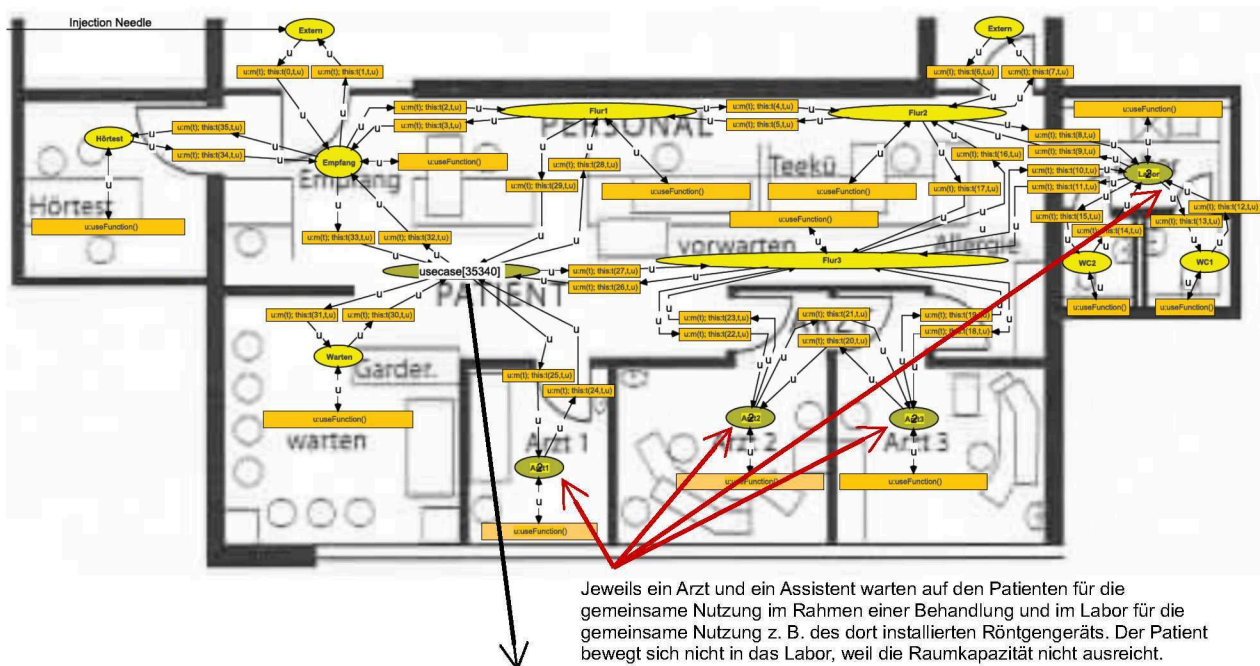
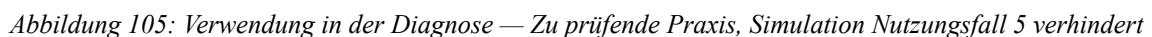


Abbildung 103: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Start der Gebäudenutzung für den Nutzungsfall 5

Abbildung 104: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Simulation Nutzungsfall 5 verhindert
Quelle aus Abbildung 83: [Neufert 2016], S. 546, Ausschnitt, ergänzt durch Einzeichnen eines Topologie-Netzes



Die Definition der gemeinsamen Nutzung in der Initiierung der Gebäudenutzung, wie in Abbildung 88 dargestellt, erfordert, dass jeweils ein Patient, Arzt und Assistent beteiligt sein müssen. Da die Raumkapazität des Labors auf zwei Personen beschränkt ist, findet keine dritte Personen Zugang zur gemeinsamen Nutzung des Labors. Eine Erhöhung der Raumkapazität im Modell, wie in Abbildung 106 gezeigt, löst diese Blockade. Eine erneute Simulation zeigt den Zugang dreier Beteiligter, und insbesondere die Nutzung gemäß des Nutzungsfalls 4. Die Abbildungen 107 und 108 zeigen den finalen Zustand des Nutzungsfalls 4 bzw. das zugehörige Nutzungsprotokoll.

Da die Raumkapazität anhand des bestehenden Grundrisses ermittelt ist, bedeutet dies eine notwendige bauliche Vergrößerung des Laborraums, um die erforderliche erhöhte Raumkapazität für die Labornutzung für kieferorthopädische Behandlungen auch zu realisieren.

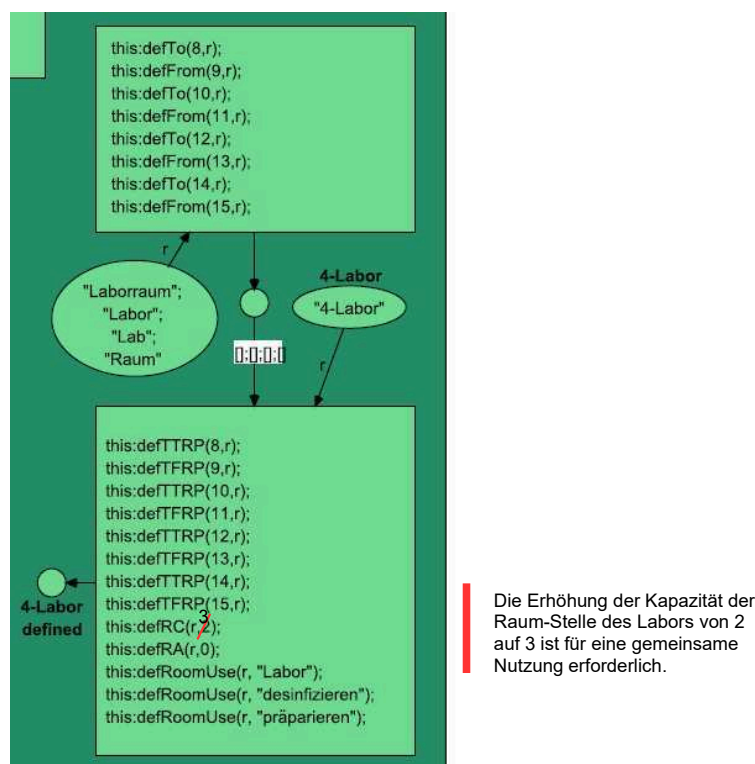


Abbildung 106: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Vergrößerung der Laborraumkapazität

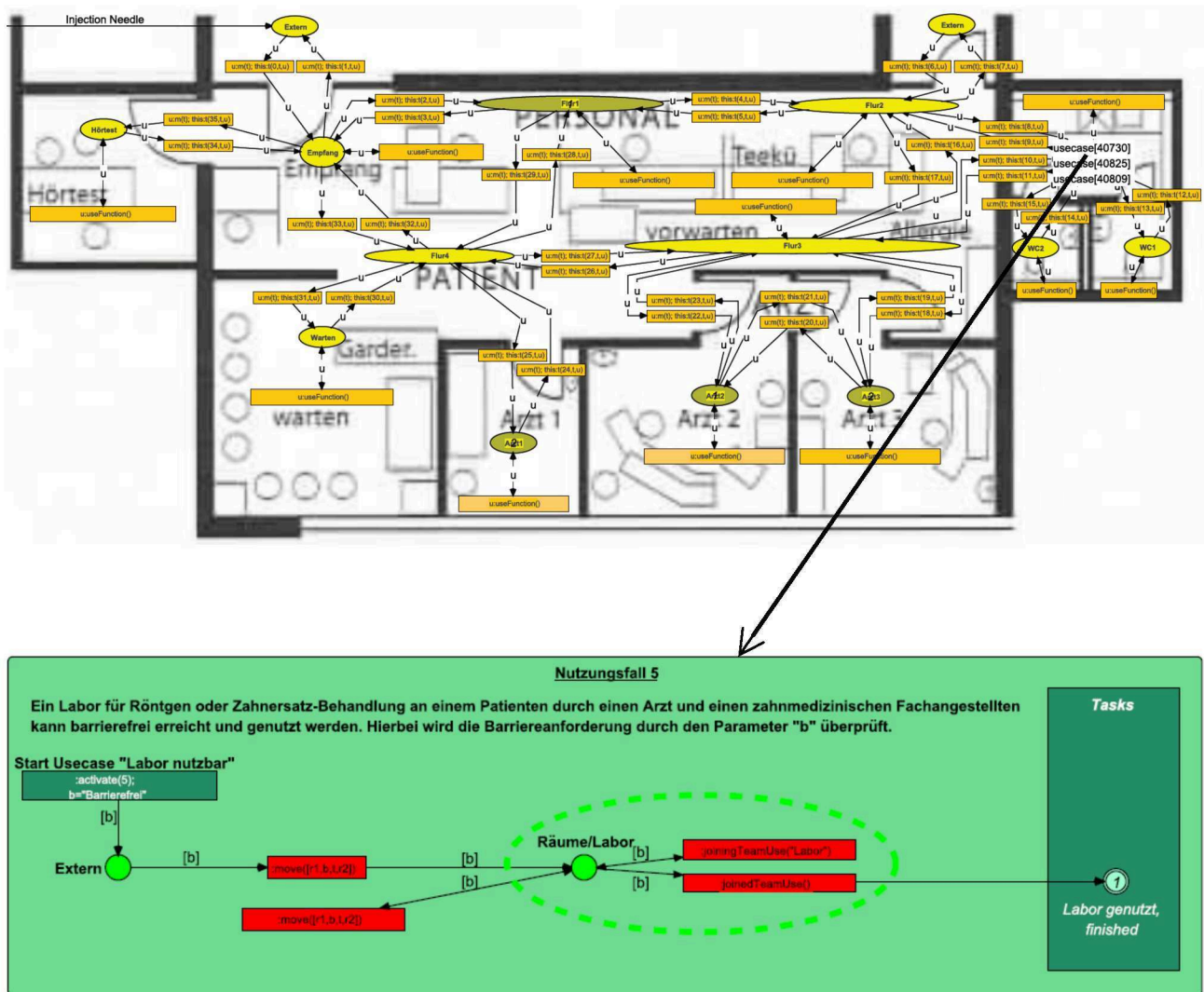


Abbildung 107: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Simulation Nutzungsfall 5: Labor nutzbar
Quelle aus Abbildung 83: [Neufert 2016], S. 546, Ausschnitt, ergänzt durch Einzeichnen eines Topologie-Netzes

Die Diagnose hat ergeben, dass die untersuchte HNO-Praxis unter Auflagen geeignet ist für den Betrieb der Zahnarztpraxis, gemessen an den Nutzungsanforderungen, die in Form von Nutzungsfällen formuliert sind. Die formale Eignungsprüfung basiert auf einem Reengineering zur Bildung des Gebäudetopologiemodells, der formalen Spezifikation der Nutzungsfälle und einer formal unterstützten Simulation. Im Ergebnis der Prüfung sind folgende Auflagen hergeleitet worden, die einer baulichen Machbarkeitsprüfung unterzogen werden müssen:

1. Der Hörtestraum wird zum Personalraum umgestaltet und mit einer entsprechenden Türsicherung ausgestattet. Im Modell bedeutet dies, dass eine Zugangsberechtigung nur für Personal spezifiziert wird.
2. Die zwei WC-Räume werden aus Platzgründen zu einem behindertengerechten WC-Raum umgebaut, welches direkt vom Flur erreichbar ist.
3. Das Labor wird durch Versetzen der Wand zu den WC-Räumen hin verbreitert. Die Zugangsberechtigung wird definiert wie die der anderen Behandlungsräume.
4. Aus Punkt 2 und 3 folgt, dass das behindertengerechte WC anstelle der bisherigen WC-Räume einen schmaleren Zuschnitt neben dem verbreiterten Laborraum erhält.

Rohdatei:

```

3, 2, 5, Patient, 0, Transition: 1, [1-Entree,Barrierefrei,Tür,01-Extern]
16, 2, 5, Patient, 0, Transition: 19, [8-Arzt3,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
10, 2, 5, Patient, 0, Transition: 23, [9-Arzt2,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
21, 2, 5, Patient, 0, Function: Labor
8, 2, 5, Patient, 0, Transition: 27, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
0, 2, 5, Patient, 0, Transition: 0, [01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
14, 2, 5, Patient, 0, Transition: 27, [10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
9, 2, 5, Patient, 0, Transition: 22, [7-Flur3,Barrierefrei,Tür,9-Arzt2]
18, 2, 5, Patient, 0, Transition: 21, [9-Arzt2,Barrierefrei,Tür,8-Arzt3]
4, 2, 5, Patient, 0, Transition: 0, [01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
7, 2, 5, Patient, 0, Transition: 33, [1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
15, 2, 5, Patient, 0, Transition: 18, [7-Flur3,Barrierefrei,Tür,8-Arzt3]
12, 2, 5, Patient, 0, Transition: 25, [10-Flur4,Barrierefrei,Tür,11-Arzt1]
5, 2, 5, Patient, 0, Transition: 1, [1-Entree,Barrierefrei,Tür,01-Extern]
11, 2, 5, Patient, 0, Transition: 26, [7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
Nr, Usecase, Act.-Type, Role, Use-Or., Use, Specification1, Specification2
1, 2, 5, Patient, 0, Transition: 1, [1-Entree,Barrierefrei,Tür,01-Extern]
2, 2, 5, Patient, 0, Transition: 0, [01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
20, 2, 5, Patient, 0, Transition: 10, [7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,4-Labor]
17, 2, 5, Patient, 0, Transition: 22, [7-Flur3,Barrierefrei,Tür,9-Arzt2]
19, 2, 5, Patient, 0, Transition: 19, [8-Arzt3,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
6, 2, 5, Patient, 0, Transition: 0, [01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
13, 2, 5, Patient, 0, Transition: 24, [11-Arzt1,Barrierefrei,Tür,10-Flur4]

```

Aufbereitete Datei:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Nr	Usecase	Act.-Type	Role	Use-Or.	Use	Specification1	Specification2
2	0	2	5	Patient	0	Transition: 0		[01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
3	1	2	5	Patient	0	Transition: 1		[1-Entree,Barrierefrei,Tür,01-Extern]
4	2	2	5	Patient	0	Transition: 0		[01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
5	3	2	5	Patient	0	Transition: 1		[1-Entree,Barrierefrei,Tür,01-Extern]
6	4	2	5	Patient	0	Transition: 0		[01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
7	5	2	5	Patient	0	Transition: 1		[1-Entree,Barrierefrei,Tür,01-Extern]
8	6	2	5	Patient	0	Transition: 0		[01-Extern,Barrierefrei,Tür,1-Entree]
9	7	2	5	Patient	0	Transition: 33		[1-Entree,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
10	8	2	5	Patient	0	Transition: 27		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
11	9	2	5	Patient	0	Transition: 22		[7-Flur3,Barrierefrei,Tür,9-Arzt2]
12	10	2	5	Patient	0	Transition: 23		[9-Arzt2,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
13	11	2	5	Patient	0	Transition: 26		[7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,10-Flur4]
14	12	2	5	Patient	0	Transition: 25		[10-Flur4,Barrierefrei,Tür,11-Arzt1]
15	13	2	5	Patient	0	Transition: 24		[11-Arzt1,Barrierefrei,Tür,10-Flur4]
16	14	2	5	Patient	0	Transition: 27		[10-Flur4,Barrierefrei,Durchgang,7-Flur3]
17	15	2	5	Patient	0	Transition: 18		[7-Flur3,Barrierefrei,Tür,8-Arzt3]
18	16	2	5	Patient	0	Transition: 19		[8-Arzt3,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
19	17	2	5	Patient	0	Transition: 22		[7-Flur3,Barrierefrei,Tür,9-Arzt2]
20	18	2	5	Patient	0	Transition: 21		[9-Arzt2,Barrierefrei,Tür,8-Arzt3]
21	19	2	5	Patient	0	Transition: 19		[8-Arzt3,Barrierefrei,Tür,7-Flur3]
22	20	2	5	Patient	0	Transition: 10		[7-Flur3,Barrierefrei,Durchgang,4-Labor]
23	21	2	5	Patient	0	Function: Labor		

Abbildung 108: Verwendung in der Diagnose — Zu prüfende Praxis, Nutzungsfall 5, Simulationsergebnis: Labor nutzbar

Die Diagramme in den Abbildungen 109, 110 und 111 umfassen diese Änderungen im Gebäudetopologiemodell. Die geometrischen Änderungen sind skizzenhaft in den Grundriss eingetragen. Die Eignungsprüfung für alle Nutzungsfälle zeigt die Nutzbarkeit der Praxisräume für die vorgesehene Nutzung als Zahnarztpraxis.

Für das Gebäudetopologiemodell sind darüber hinaus folgende Verfeinerungen sinnvoll, so dass Simulationen dem Realbetrieb möglichst nahe kommen:

- Das Funktionsangebot kann durch weitere Begriffe ausgeweitet und verfeinert werden. Beispielsweise können für das Labor weitere Funktionen spezifiziert werden, die durch den Raum unterstützte Tätigkeiten bezeichnen.

- Eine Differenzierung der Rollen würde zu einer verfeinerten Spezifikation von Nutzungsfällen, Bewegungen und Funktionsnutzungen beitragen. Denkbar sind beispielsweise die Rollen Zahnarzt, Kieferorthopäde oder Arzt mit ausschließlicher Privatliquidation.
- Die Unterscheidung des Funktionsangebots mit differenzierten Teilnahmen an gemeinsamen Funktionsangeboten nach Rollen würde die Modellierung von z. B. unterschiedlichen Behandlungsprozessen in bestimmten Räumen aufgrund bestimmter Ausstattung erlauben. Beispielsweise könnte die kieferorthopädische Behandlung als Funktion nur in bestimmten Räumen durch bestimmte Rollen möglich sein.
- Damit verbunden ist eine Differenzierung der Raumzugangsberechtigungen nach Rollen, z. B. könnte modelliert werden, dass ein Raum nur für Privatpatienten vorgesehen ist.

Dieses Beispiel zeigt die Verwendung des methodischen Vorgehens auf Basis des entwickelten Modells für die Diagnose bzw. Bestandsprüfung anhand einer Zahnarztpraxis.¹⁰¹ Aus dem Beispiel werden auch Ansatzpunkte für eine weiterführende Forschung und Entwicklung der Methode sichtbar, die diesen Ansatz nicht grundsätzlich in Frage stellen oder die Grundidee verändern. Es geht um Erweiterungen und Verfeinerungen in den Elementen Modell, Methode und Werkzeugunterstützung.

Modell: Die Ableitung des Modells aus einem gegebenen Grundriss ist aufwändig. Auf Basis von 5.2 sollte ein Werkzeug die Überführung aus einem BIM- und CAD-Modell unterstützen. Wie auch zum vorhergehenden Beispiel aus 6.1 bemerkt, zeigen die Nutzungsfallnetzinstanzen während der Simulation der Gebäudenutzung willkürliche Raumbesuche. Das zugrunde liegende Metamodell erlaubt nur eingeschränkt die Eliminierung dieses zufälligen Verhaltens. Wie in den o. g. Nutzungsfällen 4 und 5 zu sehen, führt dies zu „unnötigen“ Bewegungen bezüglich der Eignungsprüfung, wobei im Simulationsverlauf die Wahrscheinlichkeit von hundert Prozent angenähert wird, dass bei gegebener Eignung auch die Eignung durch die Simulation nachgewiesen wird. Das Metamodell wäre zu erweitern um eine solche Steuerung, die zufällige, erfolglose Mehrfachbesuche von Raumstellen eliminiert.

Methode: Die Eignungsprüfung und Machbarkeitsprüfung sollten verzahnt werden. Grundlage ist aber ein Werkzeug, das die wechselseitige Überführung von Modelländerungen unterstützt. Im Beispiel ist die Veränderung der Raumgröße des Labors und des benachbarten neuen behindertengerechten WC-Raums direkt geometrisch zu berechnen und gegen Normen zu prüfen. Erst dann ist eine Änderung des Gebäudetopologiemodells sinnvoll.

Werkzeugunterstützung: Wie unter 6.1 bemerkt, ist die Modellbildung für dieses Beispiel trotz Rückgriff auf das Petrinetz-Werkzeug Renew [Renew 2015] aufwändig, da dieses die Erstellung beliebiger Petrinetze unterstützt und somit die inhärenten Vorgaben der hier definierten Netze für Gebäudetopologie und Nutzungstopologie durch den Entwerfer eingehalten werden müssen. Ein spezialisierter Editor würde die Akzeptanz im praktischen Einsatz herstellen. Darüber hinaus sollte auf Basis 5.2 ein Werkzeug die Überführung zwischen Gebäudetopologie- und BIM-Modell unterstützen.

¹⁰¹ Die verwendeten Methoden und Vorgehensweisen sind zu Beginn dieses Abschnitts 6.2 beschrieben worden und sollen hier nicht repetiert werden.

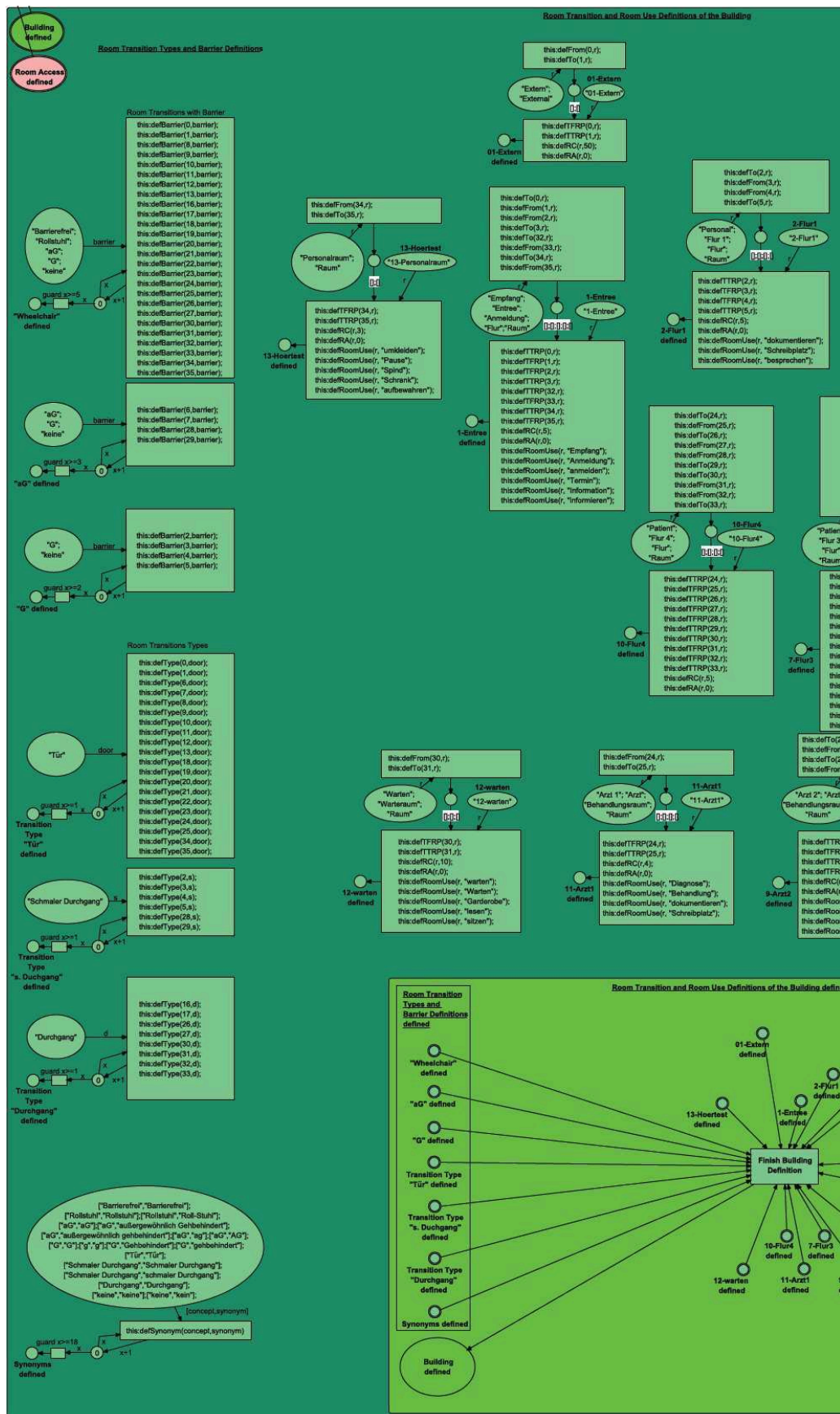


Abbildung 110: Verwendung in der Diagnose — Änderungen für eine Zahnarztpraxis, Spezifikationsnetz, Teil 1

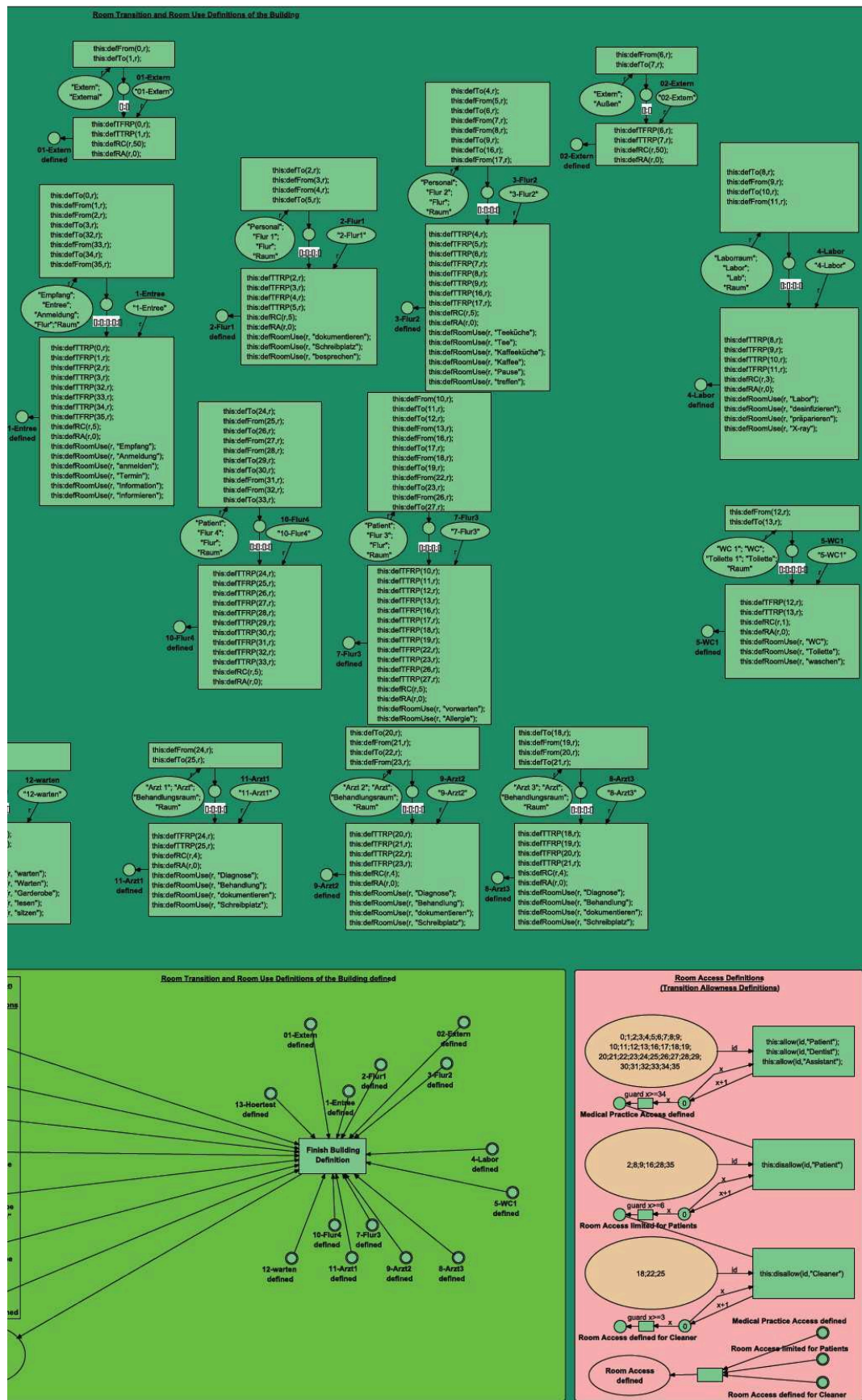


Abbildung III: Verwendung in der Diagnose — Änderungen für eine Zahnarztpraxis, Spezifikationsnetz, Teil 2

6.3 Verwendung in weiteren Beispielen

Die ausführlichen Beispiele aus 6.1 und 6.2 zeigen zwei wesentliche Verwendungen der Modellierungsmethode. Weitere Verwendungen sind möglich, die anhand von Beispielen skizziert werden.

Das erste Beispiel greift die Skalierbarkeit der Modelle auf. Es wird in 5.3.2 im Zusammenhang mit den unterstützten Methoden Designfokus, Top-Down und Bottom-Up erläutert, dass ein Gebäude oder eine Gebäudeeinheit grob- und feingranular modelliert werden kann. Auch in 3.3 wird bezüglich der Betrachtung des Gebäudes im Zusammenhang mit dem konzeptuellen Gebäudeentwurf hierauf eingegangen. Die in 3.1 genannte Studie von Gilbreth zur Einbeziehung von Bewegungsabläufen („functionalized body“) in die Planung der Anordnung von Küchenarbeitsplätzen [Pai 2002], S. 182–183, — im Sinne dieser Arbeit zugeordneter Raumfunktionen — könnte mit dieser Methode nachvollzogen und durch Simulation auch empirisch unterstützt werden. Der Ansatz hierbei ist, die Küche in räumliche Bereiche zu gliedern, diese auf Raum-Stellen abzubilden und diesen Funktionen zuzuordnen. Ein Nutzungsfall kann die in der Studie genannte Aufgabe des Kuchen Backens repräsentieren. Es kann außerdem unterschiedliches Nutzungsverhalten abgebildet werden, d. h. das von einem Verhalten reicht, welches sehr konzentriert eine Aufgabe nach der anderen abarbeitet und hierbei die Funktionsangebote des jeweiligen Küchenplatzes nutzt, bis hin zu einem Verhalten, welches viel Bewegung zwischen den Küchenarbeitsplätzen im Verlaufe der Erledigung der Aufgaben zeigt. Die Simulation der Küchennutzung würde dann Ergebnisse liefern, die Aufschluss über Schwachstellen bezüglich der Anordnung der Küchenarbeitsplätze und ihren Funktionsangeboten liefern. Des Weiteren kann das Modell durch die Repräsentation Beteiligter und differenziert modellierter Nutzungsaufgaben in der Küche verfeinert werden. Durch die Möglichkeit der Modellierung von Platzbeschränkungen kann so die Küchenlogistik in einem realitätsnahen Modell simuliert werden. Die Analyse der Simulationsergebnisse ist Grundlage für die Optimierung der Küchenarbeitsplatzgestaltung. Dieses Beispiel zeigt zum einen die Verwendung der Modellierungsmethode für die Optimierung der Logistik in Räumen und zum anderen die Skalierbarkeit der Modellbildung.

Ein zweites Beispiel greift die Verwendung zur Diagnose aus 6.2 auf. Die Verwendung zur Diagnose verfolgt das Ziel, für eine gegebene Nutzungsanforderung eine bestehende Gebäudeeinheit — im Sinne eines abgeschlossenen Raumzusammenhangs — dahingehend zu prüfen, ob die geforderte Nutzung möglich ist. Eine Erweiterung besteht nun darin, die Methode für eine Suche nach einer Gebäudeeinheit in einem Bestand zu verwenden, die eine gegebene Nutzungsanforderung unterstützt bzw. erfüllt. Hierzu sind folgende Erweiterungen erforderlich, die in zukünftigen Forschungsvorhaben ausgearbeitet werden könnten. Zu jeder Bestandsgebäudeeinheit muss ein Gebäudetopologiemodell erzeugt werden. Die Erzeugung kann dann computergestützt erfolgen, wenn ein BIM- oder CAD-Modell verfügbar ist, welches für die in 5.2 vorgeschlagene Abbildung in ein Gebäudetopologiemodell vorausgesetzt wird. Andererseits ist die Übersetzung von einem Modellierer durchzuführen, wie in 6.2 exemplarisch gezeigt wird. In beiden Fällen ist ein Werkzeug erforderlich, welches die Erzeugung der in dieser Arbeit vorgestellten Gebäudetopologiemodelle unterstützt, wie auch jeweils als Resümee in 6.1 und 6.2 dargestellt. Darüber hinaus ist eine Suchmaschine erforderlich, die eine Datenbank der Gebäudetopologiemodelle, die eine Anfragesprache aus Nutzungsfällen und einen Suchalgorithmus umfasst. Die Datenbank muss Petrinetz-Graphen in der Form der Gebäudetopologiemodelle speichern. Der Spezifikation der Modelle muss eine normierte Ontologie für Bezeichnungen für den Raum, die Barriereangabe, den Übergangstyp und die Rolle zugrunde liegen. Die Nutzungsfälle werden als Anfragesprachelemente genutzt. Auch sie müssen auf der Ontologie der Bezeichnungen basieren, damit die Unifikation im Suchalgorithmus funktionieren kann. Außerdem muss ein Nutzungsfall eine terminierende Nutzung beschreiben, also in den Tasks über eine *Task-Stelle finished* verfügen. Für die Formulierung der Anfrage aus Nutzungs-

fällen ist eine Benutzerschnittstelle erforderlich, die die normierte Erstellung der Nutzungsfall-Petrinetz-Graphen unterstützt. Für den Suchalgorithmus besteht die Idee, dass wie in der Verwendung zur Diagnose eine Simulation eines Anfrage-Nutzungsfalls für ein Gebäudetopologiemodell aus der Datenbank durchgeführt wird. Wird der Nutzungsfall mit Erreichen der Task-Stelle finished simuliert, ist die spezifizierte Nutzung möglich und das Gebäudetopologiemodell ein Kandidat für die Prüfung durch vorhandene weitere Anfrage-Nutzungsfälle. Es ist aber möglich, dass die Simulation nicht terminiert. Für diesen Fall ist die Spezifikation der Anzahl an auszuführenden Simulationsschritten, d. h. Petrinetz-Schaltvorgängen, ein Abbruchkriterium. Dadurch kann allerdings ein Gebäudetopologiemodell ausgeschlossen werden, welches tatsächlich die Nutzung ermöglicht. Dies ist ein wesentlicher Gegenstand weiterer Forschung. Der Suchalgorithmus würde alle Modelle der Datenbank auf diese Weise prüfen. Diese Suche ist parallelisierbar, wenn die Gebäudetopologiemodelle untereinander keinen Zusammenhang haben. Das Ergebnis des Suchalgorithmus ist eine Liste an Gebäudetopologiemodellen, die die durch die Anfrage-Nutzungsfälle spezifizierte Nutzungsanforderung erfüllen.

Ein drittes Beispiel beschreibt die Verwendung zur Unterstützung der Abläufe auf einer Großbaustelle. Der Fokus liegt auf der Unterstützung der Organisation komplexer funktionaler Abläufe in Großbauwerken bzw. bei deren Erstellung in der diagnostischen Fragestellung, ob alle Arbeitsabläufe wie geplant in einem gegebenen Zustand des Bauwerkes ausführbar sind. Beispiele sind erstens die Erreichbarkeit von Orten auf der Baustelle bzw. im Bauwerk im Zuge bestimmter Arbeitsabläufe mit bestimmten Arbeitsgerätschaften, zweitens die Zusammenarbeit an Orten der Baustelle bzw. im Bauwerk durch Beteiligte oder drittens die Bereitstellung von Material an Orten der Baustelle bzw. im Bauwerk. Diese Verwendung basiert auf folgender Modellbildung. Durch Nutzungsfälle und Szenarien der gemeinsamen Nutzung werden die geplanten Arbeitsabläufe verschiedener Beteiligter definiert. Diese Beschreibung spezifiziert Arbeitsabläufe in der Form, wie sie geplant ablaufen sollen. Den Beteiligten werden Rollen zugewiesen, die sie in den Arbeitsabläufen einnehmen. Die Kooperation wird in Form von Nutzungsszenarien (Team joined use) definiert. Das Gebäudetopologiemodell ist Grundlage der Prüfung durch die Simulation. Grundlage ist das BIM-Modell des entstehenden Bauwerkes im jeweiligen Bauzustand. Die Veränderung des Bauwerkes durch den Bauprozess der Baustelle über die zeitliche Dimension wird abgebildet auf eine Folge von BIM-Modellen, spezifiziert als IFC Modelle. Ein Evolutionsschritt des Bauwerkes, d. h. das Bauwerk in einem gegebenen Zustand zu einem definierten Zeitpunkt, ist dann durch die Existenz eines solchen Modells definiert. Jedes BIM-Modell der Folge wird gemäß der hier vorgestellten Modellierungsmethode auf ein Gebäudetopologiemodell abgebildet. Hier ist eine automatisierte Abbildung und daher eine Werkzeugunterstützung für die Abbildung erforderlich. Die Beantwortung der o. g. Fragen wird dann als Überprüfung der Gebäudenutzung verstanden, d. h., es wird geprüft, ob die Nutzungsfälle für die Arbeitsabläufe im interessierenden Zustand des Gebäudes abschließend simuliert werden können. Diese Simulation sollte anschaulich und interaktiv erfolgen, um mögliche Blockaden oder Ursachen für Endlosschleifen im visualisierten Gebäudemodell identifizieren zu können. Zu jedem Evolutionsschritt kann gemäß der vorgestellten Methode die Nutzbarkeit des Gebäudes anhand der spezifizierten Nutzungsfälle und des Modells der Gebäudetopologie überprüft werden. Auf die Fragestellung bezogen heißt dies: Zu jedem Evolutionsschritt des Bauwerkes kann überprüft werden, ob die geplanten Arbeitsabläufe in dem Baustellenzustand ausführbar sind.

Darüber hinaus sind weitere Verwendungen des Ansatzes möglich. Das wesentliche Vorgehen besteht in der Modellbildung von Nutzungsanforderungen und einer Gebäudetopologie und der Simulation mit dem Zweck der Überprüfung anhand von Nutzungsfällen. Interessant ist die Spezifikation unterschiedlich ausgeprägten Nutzungsverhaltens durch Nutzungsabläufe und Nutzungsorientierungen und das Einbringen größerer Mengen an Nutzungsfällen in die Simulation. So ist die Nutzungssimulation größerer Gebäude wie eines Einkaufszentrums ein spannender Verwendungsbereich.

7 Ergebnisse und Perspektive

*„Was nützt, ist nur ein Teil des Bedeutenden.
Um einen Gegenstand ganz zu besitzen, zu beherrschen,
muß man ihn um sein selbst willen studieren.“¹⁰²*

Der nutzungsorientierte konzeptuelle Gebäudeentwurf ist der in dieser Arbeit geprägte Begriff. Der Entwurf einer Modellierungsmethode und die Entwicklung eines Realisierungsansatzes sind das Ergebnis dieser Forschungsarbeit. Grundlage ist die Einordnung der Begriffe des konzeptuellen Gebäudeentwurfs und der Nutzungsorientierung in die Historie der Entwurfstheorie der vergangenen zwei Jahrhunderte und in Bezug zu aktuellen Forschungsansätzen.

Die Modellierungsmethode basiert auf ausgewählten Basismethoden des Architekturentwurfs. Die Modellierungsbasis ist anhand von Anforderungen bestimmt, die aus der Domäne des konzeptuellen Gebäudeentwurfs und der Nutzungsorientierung abgeleitet sind. Für die gewählte Modellierungsbasis der Referenznetze wird ein Werkzeug verwendet, welches geeignet ist, das Metamodell für die Modellierungsgegenstände zu entwickeln.

Der Realisierungsansatz unterstützt die Methoden der Modellbildung und Simulation, die wesentlich sind für das methodische Vorgehen, welches den Verwendungen im Gebäudeentwurf von Individual- und Spezialbauten sowie in der Diagnose und Bestandsprüfung mit dem Ausgangspunkt formal spezifizierter Nutzungsanforderungen zugrunde liegt. Die Realisierung des Metamodells basiert beispielhaft auf einem Werkzeug für Referenznetze.

Die Ergebnisse weisen einen Beitrag zur Theorie und zur Praxis der Forschung auf dem Gebiet der Architekturinformatik auf. In der Arbeit wurde an Stellen insbesondere zur Modellbildung, Simulationsmethode, Werkzeugunterstützung, Integration mit BIM und zu den Verwendungen auf weiteres Potenzial der Forschung und Entwicklung hingewiesen. Auf diese Themen wird in den anschließenden Abschnitten eingegangen.

7.1 Ergebnisse

In den Abschnitten 3.5, 4.6 und 5.4 sind die Ergebnisse zur Begriffsdefinition, Modellierungsmethode und Modellierung zur Unterstützung des Gebäudeentwurfs bereits zusammengefasst worden, um mit diesen Voraussetzungen jeweils das Verständnis für den nächsten Gedankengang zu stützen.

Die Ergebnisse werden hier anhand der Ziele aus 2.3 präsentiert. Dies geschieht strukturiert in der folgenden Darstellung in Tabelle 20. Die aufgestellten Ziele werden zur genaueren Betrachtung der erzielten Ergebnisse in ihre inhaltlichen Bestandteile zerlegt, so dass auf die einzelnen Punkte eingegangen werden kann. Zu jedem Ziel werden die erreichten Ergebnisse zusammengefasst. Hierbei wird auf die Textabschnitte mit den entsprechenden vertiefenden Darstellungen verwiesen. Zur besseren Lesbarkeit sind die Texte der Ziele *kursiv* gestellt. Die Innovation des hier vorgestellten Ansatzes zum nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurf, seiner Modellierungsmethode und seines Realisierungsansatzes wird zum Ziel Nr. 4 zusammengefasst.

¹⁰² Johann Wolfgang von Goethe: Wilhelm Meisters Wanderjahre. 1. Buch, 4. Kapitel, Hamburger Ausgabe, 11. Auflage, C. H. Beck, 1982.

Ziel	Ergebnis	Referenz
1) Die gewünschte Nutzung eines Gebäudes soll als Anforderung aufgefasst werden, die in Nutzungsfällen formalisiert beschrieben werden kann. Die Methode soll für die entsprechende Modellierung einen Rahmen geben. Ein Metamodell und darauf aufbauende Methoden und Vorgehensweisen sollen die Modellbildung der Nutzungsanforderungen mit dem Ziel der Verwendung unterstützen.		
• Eine Anforderung kann als Nutzungsfall formalisiert beschrieben werden.	• Nutzungen werden durch Nutzungsfälle spezifiziert. Ein Nutzungsfall wird als Referenznetz modelliert. Es können Nutzungsabläufe aus Bewegungen und Funktionsnutzungen graphisch repräsentiert werden. Wie in Arbeitsablaufdiagrammen kann das Erreichen von geplanten Zuständen angegeben und für den weiteren Nutzungsablauf verwendet werden. • Verschiedene Ausprägungen (Typen) von Nutzungsfällen ermöglichen die Beschreibung von Nutzungsvarianten. Für die Modellierung unterschiedlicher Nutzungsanforderungen von verschiedenen Nutzerrollen ist dies eine wichtige Voraussetzung. • Die Nutzungsanforderung kann von einer Raumanordnung abstrahieren und nur geforderte Funktionen spezifizieren. Ebenso kann die Anforderung ohne die Spezifikation einer Funktionsnutzungsanforderung erfolgen. • Somit verfügt die Modellierungsbasis über semantisch eindeutige formale Sprachmittel, so dass Nutzungsabläufe präzise spezifiziert werden können.	• 4.2.4 • 5.1.4 • 5.3.1, Tabelle 17 zum Modell des Nutzungsfalls
• Unterstützung durch Methoden und Vorgehensweisen	• Die Modellbildung der Nutzungsanforderung erfolgt durch die Übersetzung textuell formulierter Anforderungen in Referenznetz-Diagramme. Diese Aufgabe fällt in den Bereich der Computerlinguistik und ist nicht Teil der Arbeit. • Dennoch unterstützt das in der Arbeit beschriebene iterativ-inkrementelle Entwurfsvorgehen die Formulierung von Nutzungsfällen für die Vorbereitung und Durchführung der Eignungsprüfung des Gebäudes durch Simulation. Ist nämlich das Gebäudemodell weitgehend entworfen, können anhand der Topologie komplexere Nutzungsfälle aus den textuellen Anforderungen abgeleitet werden. Diese Nutzungsfall-Diagramme können für spätere vergleichbare Nutzungsanforderungen verwahrt werden.	• 5.3.1, Tabelle 18 • 5.3.3 • Beispiel in 6.1
2) Das Gebäudemodell soll ein Abstraktionsniveau besitzen, das die Unterstützung der Verwendungen erlaubt. Aus den motivierenden Beispielen geht hervor, dass die Gebäudetopologie ein geeignetes Niveau sein kann. Dies soll in der Arbeit eruiert werden. Eine geeignete Metamodellbildung ist zu finden, die diesen Modellierungsgegenstand repräsentieren kann. Auf der Basis des Gebäudemodells sollen Methoden und Vorgehensweisen den Architekten bei der Modellbildung für die Verwendungen unterstützen.		
• Metamodellbildung für das Gebäude	• Die Gebäudetopologie ist passender Modellierungsgegenstand. Ihre Definition umfasst mit dem Raum, dem Raumübergang und dem einem Raum zugeordneten Funktionsangebot die für die Modellierung der Nutzung relevanten Gegenstände. • Die Modellierungsbasis sind Referenznetze, die die Topologie und die Spezifikation der Eigenschaften des Gebäudes, also Raumbezeichnung, -kapazität, -belegung, Raumübergangstyp, Barriereangaben sowie sonstige für seine Nutzung relevante Informationen wie Raumfunktionen und Zugangsberechtigung repräsentieren. • Die Modellierungsbasis unterstützt eine einerseits hinreichend abstrakte und damit umfassende Beschreibung der Gebäudetopologie und der Funktionsnutzungsangebote, und verfügt andererseits über semantisch eindeutige formale Sprachmittel, so dass die Gebäudenutzung eindeutig spezifiziert werden kann.	• 3.3 • 4.2.2 • 5.1.2 • 5.3.1, Tabelle 17 zum Modell der Gebäudetopologie
• Unterstützung durch Methoden und Vorgehensweisen	• Die Bildung eines Gebäudetopologiemodells wird durch die Methoden Top-Down und Designfokus/Logical Zoom unterstützt. Auch die Bottom-Up-Methode trägt zur Modellbildung bei, wenn dies im Zusammenhang mit der Eignungsprüfung von Nutzungsfällen geschieht, aus denen Teile der Gebäudetopologie im Entwurf abgeleitet werden. • Das Vorgehen des Individualentwurfs und des Reengineering unterstützt die Bildung eines Gebäudetopologiemodells. Im Falle des Individualentwurfs erfolgt dies iterativ-inkrementell unter Einbeziehung der Nutzungsanforderungen, die durch Nutzungsfallmodelle spezifiziert sind. Das Reengineering dient der Ableitung eines	• 5.2 • 5.3.2, Tabelle 18 • 5.3.3 • Beispiele in 6.1 und 6.2

Ziel	Ergebnis	Referenz
	Gebäudetopologiemodells aus einem gegebenen Grundriss oder BIM-Modell auf Basis der Abbildungsbeschreibung zwischen Gebäudetopologiemodell und BIM/IFC.	
3) Für die genannten Verwendungen soll ein modellbasiertes, methodisches Vorgehen geeignet sein, den Dialog der am Entwurf Beteiligten über die Erfüllung der Nutzungsanforderungen durch das Gebäude, genauer durch seine Topologie, anhand der Nutzungsfälle zu unterstützen. Insbesondere soll das Vorgehen also die Verwendungen des Entwurfs und der Bestandsprüfung unterstützen.		
• <i>Modell</i>	Die Verwendungen basieren auf einem Modell der Gebäudenutzung. Die in beiden Verwendungen genutzte Methode der Simulation zur Eignungsprüfung setzt Modelle der Gebäudetopologie und der Nutzungsfälle voraus.	• 3.2, 3.3 • 5.1, 5.1.5 • 5.3.1, 5.3.2
• <i>Verwendung im Entwurf von Individual- und Spezialbauten</i>	- Die Bildung von Modellen für die Nutzungsfälle fördert die Präzisierung der Nutzungsanforderungen und den Dialog zwischen den Beteiligten, insbesondere Bauherr und Architekt. - Ein Gebäudetopologiemodell fokussiert die für die Nutzungsorientierung relevanten Modellierungsgegenstände und abstrahiert zunächst von gestalterischen, konstruktiven und technischen Sichten. - Das Modell der Gebäudenutzung ist Basis für eine anschauliche Prüfung der Nutzbarkeit des entworfenen Gebäudemodells hinsichtlich der Nutzungsanforderungen.	• 3.2 und 3.3 • 5.3.4 • Beispiel in 6.1
• <i>Vorgehen</i>	Folgende Vorgehensweisen unterstützen diese Verwendung: - Individualentwurf - Eignungsprüfung des Gebäudetopologiemodells für Nutzungsfallmodelle und Machbarkeitsprüfung der Realisierbarkeit in einem iterativ-inkrementellen Entwurfsvorgehen - Reengineering des Gebäudetopologiemodells für den Entwurf bei einer Umnutzung.	• 5.3.4 • 5.3.3
• <i>Methoden</i>	Die Modellierungsmethode stützt sich für diese Verwendung auf folgende Basismethoden: - Modellbildung - Fall-basiertes Schließen - Top-Down - Designfokus/Logical Zoom - Bottom-Up im Zusammenhang mit der Nutzungsfallmodellierung - Simulation.	• 5.3.4 • 5.3.2
• <i>Verwendung zur Bestandsprüfung/Diagnose</i>	- Nutzungsfallmodelle werden verwendet, um die gewünschte Nutzung im Rahmen einer Bestandsprüfung computergestützt an einem Modell des möglichen Gebäudes prüfen zu können. - Für die Diagnose des Gebäudes hinsichtlich seiner Nutzbarkeit wird ein Modell seiner Topologie gebildet. - Das Modell der Gebäudenutzung ist Basis für eine anschauliche Prüfung der Eignung eines möglichen Gebäudes für eine geforderte Nutzung.	• 3.2 und 3.3 • 5.3.4 • Beispiel in 6.2
• <i>Vorgehen</i>	Folgende Vorgehensweisen unterstützen diese Verwendung: - Reengineering des Gebäudetopologiemodells aus dem Grundriss oder BIM-Modell - Bildung von Nutzungsfallmodellen aus Anforderungsbeschreibungen - Eignungsprüfung der Topologie des möglichen Gebäudes für die Nutzungsfallmodelle - Machbarkeitsprüfung identifizierter Anpassungsnotwendigkeiten des Gebäudes.	• 5.3.4 • 5.3.3
• <i>Methoden</i>	Die Modellierungsmethode stützt sich für diese Verwendung auf folgende Basismethoden: - Modellbildung - Bottom-Up im Zusammenhang mit der Nutzungsfallmodellierung und Vorbereitung für die Eignungsprüfung - Simulation.	• 5.3.4 • 5.3.2

Ziel	Ergebnis	Referenz
4) Es sind etablierte Grundlagen der Modellbildung, Methoden des Architekturentwurfs und Vorgehensweisen für die Verwendungen zu betrachten. Hiermit soll bereits bewährtes Wissen wiederverwendet werden. Andererseits soll die Arbeit in den wissenschaftlichen Diskurs eingeordnet und die fachliche Innovation des Ansatzes abgegrenzt werden. In der Arbeit sollen Methoden des Architekturentwurfs, wie Modellbildung und Simulation, betrachtet und in das Vorgehen einbezogen werden. Bei dem Entwurf der Modellierungsmethode sollen grundsätzliche Anforderungen berücksichtigt werden: Vertrautheit und hohe Verständlichkeit der Modellierungssprache, Angemessenheit, Integrierbarkeit und Orientierung an der graphisch geprägten Arbeitsweise des Architekten.		
• Grundlagen der Modellbildung	- Für die Entwicklung des Metamodells der Gebäudetopologie werden der Gebäudebegriff im Zusammenhang mit dem konzeptuellen Entwurf und dem Begriff der Nutzungsorientierung betrachtet und die für diesen Ansatz relevanten Modellierungsgegenstände des Gebäudes, Raums, Raumübergangs und der Nutzung hergeleitet. Die Eigenschaften Kapazität und Belegung des Raums und der Typ und die Barriereangabe eines Raumübergangs werden ergänzt. Die Zugangsberechtigung ist eine mit dem Raumübergang assoziierte Eigenschaft. Die einem Raum zugeordnete Funktion wird abstrakt dem Gebäudetopologiemodell zugeordnet und in einem Spezifikationsmodell definiert. - Für die Modellbildung wird für besondere Objekte der Gebäudetopologie eine Entscheidungshilfe gegeben. - Anforderungen an die hergeleiteten Modellierungsgegenstände und die als relevant erachteten Basismethoden des Architekturentwurfs bilden die Bewertungskriterien für die Bestimmung von Referenznetzen als Modellierungsbasis.	• 3.2 • 3.3 • 4.2 • 4.3 • 5.1, insbes. 5.1.2 • 5.3.1
• Methodische Grundlagen	- Der nutzungsorientierte Entwurf eines Gebäudes weicht nicht von methodischen Grundlagen des Architekturentwurfs ab, sondern ergänzt den Fokus auf die Modellierung der Nutzungsorientierung. - Unter den Basismethoden des Architekturentwurfs werden die Methoden Modellbildung, Simulation, Top-Down, Bottom-Up, Fallbasiertes Schließen und Designfokus/Logical Zoom für die hier vorgestellte Modellierungsmethode selektiert und in Bezug zu der Modellbildung des nutzungsorientierten konzeptuellen Entwurfs gesetzt.	• 4.1 • 5.3.2
• Grundlagen des (methodischen) Vorgehens	- Für die Gestaltung der Vorgehensweise für den hier vorgestellten nutzungsorientierten konzeptuellen Entwurf werden einige Ansätze des konzeptuellen Entwurfs in der Historie der letzten beiden Jahrhunderte betrachtet und hinsichtlich Ähnlichkeiten und Unterschieden positioniert. Insbesondere wird erläutert, dass die Methode den Gebäudeentwurf auf die Nutzung fokussiert. - Es werden die hiermit zusammenhängenden Konzepte identifiziert, welche die hier entwickelten Modellierungsgegenstände, die angewandten Methoden, das Vorgehen und die Verwendung in den historischen Kontext einordnen. - Für den Begriff der Nutzungsorientierung wird eine historische Anknüpfung in der Entwurfstheorie herausgearbeitet, die zeigt, dass eine funktionale Betrachtung seit Jahrzehnten im Interesse der Forschung steht und formale Ansätze hervorbrachte, denen nun dieser neue Ansatz hinzugefügt wird, der verfeinerte und wesentlich erweiterte Möglichkeiten bezüglich formaler Grundlage, methodischer Unterstützung und Werkzeugunterstützung einbringt. - Auch der aktuelle Stand computergestützter oder durch Informatik-Ansätze fundierter Arbeiten mit Bezug zur Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs wird betrachtet. Der Schwerpunkt des hier vorgestellten Ansatzes wird jeweils jenen gegenüber abgegrenzt.	• 3.1 • 3.2 • 3.4 • 4.5 • 5.3.3
• Innovation des vorgestellten Ansatzes	- Mit Bezug auf den betrachteten aktuellen Stand stellt der hier vorgestellte Ansatz eine Innovation in der Unterstützung des konzeptuellen Entwurfs mit dem Fokus auf die Nutzungsorientierung durch eine formal begründete Modellierungsmethode und einen Realisierungsansatz dar, der mit BIM integriert werden kann. - Durch den Ansatz wird die Möglichkeit geschaffen, - die Gebäudenutzung zu modellieren und zu simulieren, dies auf Basis von	• 3.4 und 4.5, Tabelle 12 • 4.4, insbes. 4.4.4 • 5.2 • 5.3

Ziel	Ergebnis	Referenz
	Nutzungsfallmodellen, die Nutzungsabläufe aus Bewegung und Funktionsnutzung spezifizieren ◦ Funktionsangebote zu spezifizieren ◦ Funktionsnutzung als Einzelnutzung, gemeinsame Nutzung und als Nutzungsszenarien mit definierten Rollen zu spezifizieren ◦ Nutzungsorientierung, Barriereanforderung und Zugangsberechtigung zu spezifizieren. • Mit Referenznetzen erfolgt die Anwendung einer praktisch anerkannten und theoretisch fundierten Modellierungsbasis und des erprobten Werkzeugs Renew auf Basis offener und verbreiteter Technologie (Java-Plattform). • Gleichzeitig ist das methodische Vorgehen auf Basismethoden des Architekturentwurfs und die Lebenszyklusphasen eines Gebäudes gegründet, so dass eine Integration in etablierte Vorgehensweisen und BIM-Werkzeuge vorbereitet ist. • Es wird gezeigt, wie das Vorgehen dieser Modellierungsmethode die Verwendungen des Entwurfs von Individual- oder Spezialbauten und der Diagnose und Bestandsprüfung unterstützt. Ansätze für weitere Verwendungen sind beschrieben.	• Beispiele der Verwendung in 6 • [Kummer 2002], [Renew 2015]
5) Der Realisierungsansatz soll bewährte Vorgehensweisen ergänzen und mit etablierten Modellen wie BIM integrierbar sein. Aufgezeigt werden sollen dazu die zu ergänzenden und ggf. abzuändernden Vorgehensweisen im konzeptuellen Gebäudeentwurf. Bezüglich der BIM-Integration soll erarbeitet werden, welche Modell-Elemente eines BIM auf Basis der IFC mit dem hier vorgestellten Ansatz für eine zukünftige integrierte Software-Lösung verbunden werden können.		
• Integration mit BIM, IFC	• Die vorgeschlagene Integration basiert auf einer Abbildung zwischen dem Metamodell für die Gebäudetopologie und Klassen der IFC. • Die Integration auf Modellebene ist Voraussetzung für eine Werkzeugunterstützung des vorgestellten iterativ-inkrementellen Vorgehens im Gebäudeentwurf, damit die Modellinformation der Gebäudetopologie in des BIM-Modell übertragen werden oder Information aus dem BIM-Modell in die Bildung des Gebäudetopologiemodells eingehen kann.	• 5.2 • 5.3.3
• Werkzeugunterstützung	• Für den Realisierungsansatz ist ein Metamodell auf Basis von Referenznetzen entwickelt worden. Das Werkzeug Renew wird beispielhaft zur Demonstration einer Werkzeugunterstützung angewendet. • Renew verfügt über die Möglichkeit der Erstellung und Simulation graphischer Petrinetz-Diagramme. Diese Möglichkeit unterstützt das Verständnis der modellierten Gebäudetopologie und der Nutzungsfälle. Die graphische Simulation erleichtert das Verständnis und den Dialog über die simulierte Gebäudenutzung und über Folgen von Entwurfsentscheidungen am graphischen Modell. • Referenznetze verfügen aufgrund theoretisch begründeter Eigenschaften über weniger Analysemöglichkeiten als S/T-Netze. Dies betrifft Aussagen über die Lebendigkeit und die Erreichbarkeitsanalyse. Das Werkzeug Renew verfügt nicht über eine Erreichbarkeitsanalyse bestimmter Netzzustände, die also im übertragenen Sinne die Belegungen der Gebäuderäume mit bestimmten Nutzungsfällen beantworten kann. Die Simulation ist demnach das Mittel, welches den Architekten derzeit in der Analyse der Gebäudenutzung unterstützt. • Es wurde eine Grundlage geschaffen für die Einführung und zukünftige Integration von Simulationswerkzeugen in BIM-Werkzeuge, um die Gebäudenutzung mit allgemeinen Nutzungsfällen modellieren, simulieren und dadurch in die Gebäudemodellierung und -planung einbeziehen zu können.	• 5.3.4, Tabelle 19 • Beispiele der Verwendung in 6 • 4.4.2, [Köhler 2010] • [Renew 2015], ¹⁰³

Tabelle 20: Ergebnisse anhand der Ziele

103 Laut Lizenzbedingungen ist die Verwendung mit Renew erstellter Arbeiten erlaubt: „You are permitted to use works that you create with Renew (i.e., Java stubs, net drawings, EPS/PDF output, simulation states, and other exported data) without restrictions.“ [Renew Lizenz].

7.2 Ansätze für weitere Arbeiten

Die dargestellten Ergebnisse eröffnen Ansatzpunkte für eine weiterführende interessante Forschung und Entwicklung. In den bisherigen Darstellungen, insbesondere in den anschaulichen Beispielen in 6 sind bereits einige Punkte begründet worden, die diese Modellierungsmethode nicht grundsätzlich in Frage stellen oder die Grundidee verändern. Es geht um Erweiterungen und Verfeinerungen schwerpunktmäßig in den Elementen Modell, Methode und Werkzeugunterstützung. Auch weitere Verwendungsmöglichkeiten wurden in 6.3 angesprochen. Diese Ansatzpunkte werden in diesem Abschnitt zusammengefasst und münden in einer Liste hieraus initiiertbarer Forschungs- und Entwicklungsprojekte in Tabelle 21.

Durch Erweiterung der vorgestellten Metamodelle¹⁰⁴ für Gebäudetopologie, Nutzung und Nutzungsfall kann eine genauere Modellbildung der Nutzungsorientierung erreicht werden. Die erste Erweiterung betrifft die *zielgerichtete Gebäudenutzung*. Die zugrunde liegenden Metamodelle erlauben nur eingeschränkt die Eliminierung zufälligen Verhaltens der Nutzungsfallnetzinstanzen. In den Beispielen in 6.1 und 6.2 ist dies gezeigt und erklärt. Dies führt zu „unnötigen“ Bewegungen bezüglich der Eignungsprüfung, wobei im Simulationsverlauf die Wahrscheinlichkeit von hundert Prozent angenähert wird, dass bei gegebener Eignung auch die Eignung durch die Simulation nachgewiesen wird. Zwar kann durch die Modellierung der Nutzungsorientierung eine Priorität zwischen funktions- und bewegungsorientierter Nutzung vorgegeben werden. Die Modellierung einer zielgerichteten, evtl. selbst gesteuerten Bewegung einer Nutzungsfallinstanz wäre eine Erweiterung, die die „unnötigen“ Bewegungen reduzierte. Das Metamodell wäre zu erweitern um eine solche Steuerung, die zufällige, erfolglose Mehrfachbesuche von Raum-Stellen eliminiert.

Hierauf baut die zweite Erweiterung der *Bewertung der Gebäudelogistik* auf, d. h. die Bewertung, wie die Bewegung von Objekten innerhalb eines Gebäudes durch die topologischen Gegebenheiten unterstützt oder gehindert wird. Erweiterungen aller Metamodelle sind erforderlich. Es könnte dann nicht nur die grundsätzliche Eignung, sondern auch die Effizienz der Nutzung durch Bewegungszählung ermittelt werden. Die Ergänzung von Metriken kann quantitative Aussagen über die Bewegungen und damit eine Bewegungsmessung liefern. Das Gebäudetopologiemodell wäre dann zu ergänzen um Raumabstände und das Nutzungsfallmodell um eine Streckenanforderung (z. B. max. Weglänge). Die Modellierung zielgerichteter Bewegung wäre Grundlage der Messung von Bewegungen in einer Gebäudetopologie. Die Simulation ist dann um entsprechende Messwerkzeuge zu erweitern, die durch Messpunkte und Protokollierungen der Bewegungsnutzung einzelner Nutzungsfallinstanzen Daten für Analysen erheben. Diese Daten könnten dann zur Optimierung der Gebäudetopologie, also der Anordnung von Räumen und Übergangsbeziehungen sowie der Platzierung von Funktionsangeboten, verwendet werden.

Durch die genannten ersten beiden Erweiterungen kann als neue Verwendung die Optimierung einer Gebäudelogistik erschlossen werden, wobei hier die vorhandene Möglichkeit der Modellierung von Nutzungsfalltypen und Erzeugung entsprechend verschiedener Nutzungsfallinstanzen genutzt werden kann. In den Optimierungsprozess würden diese Instanzen eingebracht, die ihre eigene Nutzungsanforderung haben und dadurch ihre Nutzung des Gebäudes bestimmen.

Die dritte Erweiterung betrifft die *Abbildung zwischen BIM und dem Metamodell der Gebäudetopologie*. Die Ableitung eines Gebäudetopologiemodells aus einem gegebenen Grundriss ist aufwändig. Auf Basis 5.2 sollte ein Werkzeug die Überführung zwischen Gebäudetopologie- und BIM-Modell unterstützen.¹⁰⁵ Daten aus einem BIM-Modell sollen für die Erstellung und Fortschreibung

¹⁰⁴ Vergleiche 5.1.

¹⁰⁵ Einem BIM-Modell ist gegenüber einem CAD-Modell der Vorzug zu geben, da dies dem Stand der Technik entspricht, wie in [BIM 2015] erläutert. Die Erwartungshaltung ist in der Forschung, dass BIM als umfassendes Abbild eines Gebäudes und tangierter Prozesse sehr wichtig ist für die Aufgaben und die Rolle des Architekten:

eines Gebäudetopologiemodells genutzt werden können. Umgekehrt sollen die Daten eines Gebäudetopologiemodells auch nutzbar für die Erzeugung und Fortschreibung eines BIM-Modells sein. Zur Unterstützung eines iterativ-inkrementellen Entwurfsvorgehens ist eine Werkzeugintegration auf Basis verbundener Modelle erforderlich. Ein Beispiel ist die Verzahnung von Eignungsprüfung und Machbarkeitsprüfung. Grundlage ist ein Werkzeug, das die wechselseitige Überführung von Modelländerungen unterstützt. Im Beispiel aus 6.2 ist die Veränderung der Raumgröße des Labors und des benachbarten neuen behindertengerechten WC-Raums direkt geometrisch zu berechnen und gegen Normen zu prüfen. Erst dann ist eine Änderung des Gebäudetopologiemodells sinnvoll.

Die vierte Erweiterung betrifft eine Werkzeugunterstützung. Zur Unterstützung der Erstellung von Gebäudetopologie- und Nutzungsfallmodellen ist eine einheitliche Terminologie der Entitäten Raum, Raumübergang, Barriere, Übergangstyp, Funktion und Rolle erforderlich. Der gegenwärtige Ansatz kann hier um ein Werkzeug erweitert werden, welches eine *Terminologie und Ontologie* für diese Entitäten verwaltet und der Erstellung von Gebäudetopologie- und Nutzungsfallmodellen bereitstellt. Hierdurch wird der Entwerfer sehr entlastet, konsistente Modelle zu erstellen und fortzuschreiben.

Als fünfte und sechste Erweiterung sollte je ein *Editor* für *Gebäudetopologiemodelle* bzw. *Nutzungsfallmodelle* geschaffen werden. Die Modellbildung der in 6.1 und 6.2 gezeigten Beispiele ist trotz Rückgriff auf das Petrinetz-Werkzeug Renew [Renew 2015] aufwändig, da dieses die Erstellung beliebiger Referenznetze unterstützt. Somit müssen die inhärenten Vorgaben der Netze für Gebäudetopologie und Nutzungsfalltopologie durch den Entwerfer eingehalten werden. Ein spezialisierter Editor würde die Akzeptanz im praktischen Einsatz herstellen. Diese Editoren sollten die Erstellung von Topologie-Netzen des Gebäudetopologiemodells bzw. von Nutzungstopologie-Netzen unterstützen. Dabei sollte eine Verbindung existieren, die die Bildung von Gebäudetopologie-Ausschnitten aus Nutzungsfällen erlaubt, also das Vorgehen unterstützt, welches im Beispiel in 6.1 gezeigt wird. Schließlich ist eine Integration dieser Editoren auf Basis der oben genannten dritten Erweiterung mit BIM erforderlich, um den iterativ-inkrementellen Entwurf eines Gebäudetopologiemodells und BIM-Modells, insbesondere geometrisch/technisches Modell, zu verzahnen.

Die siebte Erweiterung würde die Anschauung der Gebäudenutzung für den Entwerfer, Bauherrn und weitere Beteiligte erhöhen. Ein *graphischer Simulator für die Visualisierung der Gebäudenutzung* im 3D BIM-Modell setzt die Integration zwischen den Modellen voraus. Insbesondere müssen im Werkzeug das Gebäudetopologiemodell mit dem geometrischen BIM-Modell so verbunden sein, dass das gegenwärtige Referenznetzdiagramm der Gebäudetopologie graphisch in das visualisierte BIM-Modell integriert wird. Die Methode der Simulation würde aufgewertet und das Vorgehen des iterativ-inkrementellen Entwerfens für alle Verwendungen durch die verbesserte Anschauung deutlich unterstützt.

Die achte Erweiterung würde den Entwurf dahingehend unterstützen, dass auf bereits existierende Gebäudetopologiemodelle zurückgegriffen werden kann. Ein Werkzeug zur Unterstützung der Methode des *Fallbasierten Schließens für Gebäudetopologiemodelle* sollte den Architekten beim Entwurf einer Gebäudetopologie aufgrund gegebener Nutzungsfallmodelle unterstützen. Ein Rückgriff auf eine Datenbank mit Gebäudetopologiemodellen in Form von Referenznetzen bedeutet die Abfrage dieser Graphen aus einer Datenbank anhand von Anfragen in Form der entsprechenden Nutzungstopologie-Netze oder Ausschnitte dieser. Das in 3.4 erwähnte Projekt METIS [METIS-TUM 2017] verfolgt auch den Rückgriff auf bestehende Modelle zur Unterstützung früher Entwurfsphasen. Ein Austausch über die Erfahrung bezüglich der Akzeptanz und Produktivitätssteigerung durch ein derartiges Werkzeug sollte in die Entscheidung zur Umsetzung dieser Erweiterung eingehen.

„BIM will be the core of the digital planning process, but it will not replace everything we do as architects.“ [Russell Elger 2008].

<i>Projekttitel</i>	<i>Kurzbeschreibung</i>	<i>Bezug</i>
1. Nutzungsfallmetamodell für eine zielgerichtete Gebäudenutzung	• Erweiterung der Nutzungsorientierung • Vorgabe zielgerichteter Gebäudenutzung.	Modell
2. Bewertung der Gebäudelogistik	• Bewegungsmessungen, Messpunkte • Metrik: Raumabstände und Streckenanforderung • Erweiterung aller Metamodelle • Verwendung in der Bewegungsmessung für die Bewertung der Gebäudelogistik.	Modell, Methode, Vorgehen, Verwendung
3. Abbildung zwischen BIM und dem Metamodell der Gebäudetopologie	• Übernahme von BIM-Daten in ein Gebäudetopologie-modell zur Erstellung und Fortschreibung und umgekehrt • Unterstützung eines iterativ-inkrementellen Entwurfsvorgehens.	Modell, Methode, Vorgehen, Werkzeugunterstützung
4. Terminologie und Ontologie für Modelle (Gebäudetopologie und Nutzungsfall)	• Verwaltung von Terminologie für Modellierungsgegenstände und Bereitstellung für Modellerstellung und -fortschreibung.	Modell, Werkzeugunterstützung
5. Editor für Gebäudetopologiemodelle	• Auf die Unterstützung der Erstellung von Gebäudetopologiemodellen spezialisierter Editor. • Der Editor soll auf der unter 3. genannten Abbildung zwischen den Modellen basieren.	Vorgehen, Methode, Werkzeugunterstützung
6. Editor für Nutzungsfallmodelle	• Auf die Unterstützung der Erstellung von Nutzungsfallmodellen spezialisierter Editor. • Der Editor soll auf der unter 3. genannten Abbildung zwischen den Modellen basieren.	Vorgehen, Methode, Werkzeugunterstützung
7. Graphischer Simulator für die Visualisierung der Gebäudenutzung	• Graphische Integration des Referenznetzdiagramms für die Simulation in das visualisierte BIM-Modell.	Methode, Vorgehen, Verwendung, Werkzeugunterstützung
8. Fallbasiertes Schließen für Gebäudetopologiemodelle	• Werkzeug für den Zugriff auf bereits erstellte Gebäudetopologiemodelle.	Methode, Vorgehen, Werkzeugunterstützung

Tabelle 21: Perspektive: Forschungs- und Entwicklungsprojekte

7.3 Beitrag zur Theorie und Praxis der Architekturinformatik

Die genannten Ergebnisse, ohne die Details aus 7.1 zu wiederholen, können zum einen der Theorie und zum anderen der Praxis der Architekturinformatik zugeordnet werden. Ganz dem interdisziplinären Thema entsprechend, können Beiträge eher der Architektur und andere eher der Informatik zugeordnet werden. Dem Stile der Darstellungen folgend, den der Autor zum Ausdruck hoher Strukturiertheit gewählt hat, könnte nun eine zweidimensionale Einordnung nach Theorie und Praxis sowie Architektur und Informatik folgen. Das ist aber nicht beabsichtigt, weil eine klare Trennung künstlich wäre und ein Beitrag für die Informatik praktischen Charakter haben kann, während er aus Sicht der Architektur theoretisch eingeschätzt wird. Daher verzichtet der Autor auf eine Tabelle 22 und fasst in Prosa zusammen.

Im Rahmen des Diskurses über den funktionalisierten Raum und Nutzer ist die Einführung des Begriffs des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs ein neuer Schritt zu einer Vervollständigung des Verständnisses über die Modellbildung von Gebäuden und ihrer Nutzung. Die formale Modellbildung zu den Unterbegriffen Gebäudenutzung, Gebäudetopologie, Nutzung und Nutzungsfall beschreibt in 5.1 eindeutig diese Begriffe, welche nicht ohne Herleitung identifiziert worden sind. Denn diese Begriffe sind aus der Historie der Entwurfstheorie auf Basis der Begriffe des konzeptuellen Gebäudeentwurfs und der Nutzungsorientierung in 3.1 bzw. 3.2 hergeleitet und als Modellierungsgegenstände für die Metamodellbildung in 4.2 definiert worden. Die Auswahl einer Basis für die Metamodellbildung ist erforderlich für die angestrebte Unterstützung durch ein computergestütztes, methodisches Vorgehen. Dies erfordert eine Modellbildung mit Methoden und einer Technologie der Informatik. Die strukturierte Auswahl unter anerkannten Modellierungskonzepten ist aus Sicht der Informatik eine praktische Aufgabe. Die gewählte Modellierungsbasis eines speziellen Petrinetztyps, der Referenznetze, die die dynamischen Aspekte der Gebäudenutzung repräsentieren können und damit die Methode der Simulation differenzierter Nutzungsabläufe ermöglichen, ist eine für die Praxis der Informatik interessante Anwendung der Referenznetze. Für Referenznetze ist die hier vorgestellte Anwendung neu, insbesondere die Idee der Modellbildung der Gebäudenutzung, indem ein Gebäudetopologiemodell durch ein Systemnetz und Nutzungsfallmodelle als Elementnetze repräsentiert werden. Über diese Anwendung wurde in der Literatur noch nicht berichtet, wenngleich Petrinetze in Architektur und Bauwirtschaft in anderen Fällen Verwendung finden, wie in 4.4.3 dargestellt. Für die Architekturinformatik ist die formale Definition der oben genannten Begriffe auf der Basis der Referenznetze eine neue und sehr passende Basis für die Modellierung der Gebäudenutzung, die mit der Anwendung der Basismethoden des Architekturentwurfs zusammenpasst, wie in 5.3 beschrieben und in 6 an Beispielen veranschaulicht. Die Verwendungen im Entwurf von Individual- und Spezialbauten sowie in der Diagnose zur Bestandsprüfung aufgrund formal spezifizierter Nutzungsanforderungen in Form von Nutzungsfällen werden unterstützt durch das methodische Vorgehen auf Basis von Modellen für die Gebäudenutzung, Gebäudetopologie und Nutzungsfälle, die aufgrund von Metamodellen aus Referenznetzen gebildet sind. Das verwendete Petrinetz-Werkzeug Renew [Renew 2015] zeigt grundsätzlich die Simulation der Gebäudenutzung auf Basis der Modelle für das konkrete Gebäude und die Nutzungsfälle auf Basis der durch die Regelwerke implementierten Logik der Metamodelle. Hier handelt es sich um eine komplexere Metamodellbildung, die eine interessante praktische Anwendung der Referenznetze ist. Der theoretische Beitrag für die Architekturinformatik liegt in der formal basierten Definition der Begriffe des nutzungsorientierten konzeptuellen Gebäudeentwurfs und seiner Unterbegriffe der Gebäudenutzung, Gebäudetopologie, Nutzung und des Nutzungsfalls, sowie der Unterstützung durch die Metamodelle und das methodische Vorgehen auf Basis des gewählten Realisierungsansatzes mit Referenznetzen.

Für die Wahl einer Modellierungsbasis liegt die Verwendung von BIM mit den IFC¹⁰⁶ im aktuellen Diskurs der Architekturinformatik nahe. Die IFC basieren auf einem objektorientierten Paradigma zur Abbildung der Realität in Objektmodellen. Der erforderliche Modellierungsgegenstand der Gebäudenutzung mit ihrer inhärenten Dynamik ist mit Petrinetzen besser abzubilden, wie die Untersuchung der allgemeineren UML in 4.3 zeigt, die die anerkannte vereinheitlichte Modellierungssprache für die Bildung objektorientierter Systeme ist. Dennoch wäre der vorgestellte Ansatz wertlos, wenn es keine Integrationspunkte zum BIM und der IFC gibt. In 5.2 wird gezeigt, wie eine Abbildung zwischen einem Gebäudetopologiemodell und einem BIM-Modell erfolgt. Es wird gezeigt, dass Integrationsmöglichkeiten zwischen BIM-Modellen auf Basis der IFC und den hier definierten Modellen bestehen, die in Integrationswerkzeugen implementiert werden können. Dies ist Grundlage dafür, dass der vorgestellte Realisierungsansatz zu einem praktischen Beitrag zur Architekturinformatik im Sinne der Erweiterung von BIM-Werkzeugen um die Modellierung der Nutzungsorientierung wird. Insofern ist die Arbeit auch ein Beitrag zum Diskurs über die Erweiterung von BIM um den Aspekt der Nutzungsorientierung und einer entsprechenden Erweiterung der Modellierungsbasis.

Die Überprüfung der Nutzbarkeit eines Gebäudes unter dem Begriff des Model Checking ist in der Historie vielfach diskutiert und realisiert worden. Hierbei wird ein Modell des Gebäudes oder eine spezielle Abbildung des interessierenden Wirklichkeitsausschnitts gebildet. Die Anwendungsbereiche sind speziell, wie in 3.4 erläutert. Genannte Beispiele sind die Fluchtwegplanung und Barriereprüfung. Die vorgestellte Modellierungsmethode bietet erstmalig die Möglichkeit, allgemeine Nutzungsanforderungen als Nutzungsfälle mit Nutzungsabläufen, die aus der Domäne des Nutzers stammen können, formal in graphischer Form zu spezifizieren und die Gebäudenutzung durch Simulation zu prüfen. Sie stellt damit einen bezüglich der Modellbasis neuen Beitrag zur Theorie und bezüglich der Werkzeugunterstützung des methodischen Vorgehens einen neuen Beitrag zur Praxis der Architekturinformatik dar.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zur Begriffsbildung des nutzungsorientierten konzeptuellen Entwurfs, zum Entwurf einer Modellierungsmethode und zur Entwicklung eines Realisierungsansatzes sind ein neuer Beitrag zur Theorie und Praxis der Architekturinformatik.

106 Vergleiche 8.

8 Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis

Kürzel	Langtext	Eingeführt in Abschnitt
BIM	Building Information Modeling	2
CAAD	Computer Aided Architectural Design	2
CAD	Computer Aided Design	2
DIN	Deutsches Institut für Normung	-
ID, Id	Identifikation	-
IFC	Industry Foundation Classes	2
IT	Information Technology, dt. Informationstechnologie	-
Java	Java steht für die Java-Programmiersprache, wird auch verwendet für eine Java-Plattform oder -Umgebung. Java ist von der Firma Sun Microsystems veröffentlicht worden, welche von der Firma Oracle aufgekauft wurde. Weitere Informationen unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Java_(Programmiersprache) und https://java.com/de/	-
PrT-Netz	Prädikat-Transitionen-Netz	4.4.3
S/T-Netz	Stellen/Transitionen-Netz	4.3.2
UC, uc	Usecase, dt. Nutzungsfall	4.2.4
UML	Unified Modeling Language	4.3.2

9 Literaturverzeichnis

- [Alexander 1977] C. Alexander, et al.: A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction. Oxford University Press, 1977.
- [ASK 1993] Volker Mackert (Redaktion), ASK Akademische Software Kooperation (Hrsg.): Software-Führer '93/'94 Lehre und Forschung: Ingenieurwissenschaften. Springer Verlag, 1993.
- [Balzert 1996] Balzert: Lehrbuch der Software-Technik. Spektrum Akademischer Verlag, 1996.
- [BIM 2015] Borrmann, König, Koch, Beetz et al.: Building Information Modeling. Springer Vieweg, 2015.
- [BRJ 2006] Grady Booch, James Rumbaugh, Ivar Jacobson: Das UML-Benutzerhandbuch (aktuell zur Version 2.0). Addison-Wesley, 2006.
- [CAPsNET 1991] M. Frank, V. Schmidt: C.A.P.'s NET: Ein Simulationsprogramm für erweiterte nat-Petri-Netze. <https://books.google.de/books?id=FHygBgAAQBAJ&pg=PA256&lpg=PA256&dq=Petri+C.A.P.%C2%B4s+NET&source=bl&ots=zZKfhnmlYB&sig=RT2H6ZOEQmrCm63rvtXlRJ3MBc&hl=de&sa=X&ved=0ahUKEwiK44aWg6nQAhUErRQKHxmrDo0Q6AEIijAB#v=onepage&q=Petri%20C.A.P.%C2%B4s%20NET&f=false>, 14.11.2016.
- [Chahrour 2007] Racha Chahrour: Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau. Dissertation, Universität Kassel, 2007.
- [Eastman et al. 2009] C. Eastman, Jae-min Lee, Yeon-suk Jeong, Jin-kook Lee: Automatic rule-based checking of building designs. In: Automation in Construction 18, 2009.
- [Flemming 1987a] Ulrich Flemming: More than the Sum of Parts: The Grammar of Queen Anne Houses. In: Environment and Planning B: Planning and Design, 1987.
- [Flemming 1987b] Ulrich Flemming: The Role of Shape Grammars in the Analysis and Creation of Designs. In: Computability of Design, 1987.
- [Flemming 1994] Ulrich Flemming: Computerunterstützung für den Vorentwurf: das SEED Projekt. In: Wissenschaftliche Zeitung der HAB -Universität-, 1994.
- [Frank 1995] M. Frank: Partielles Parsing zur inhaltlichen Erschließung medizinischer Befundtexte. Diplomarbeit, RWTH Aachen, 1995.
- [Hillier Hanson 2005] Hillier, Hanson: The social logic of space. Cambridge Univ. Press, 2005.
- [Hübner 2012] Matthias Hübner: Modellbildung und Regelung eines kooperativen Straßenverkehrs mittels Petrinetzen und Konsens-Algorithmen. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2012.
- [IFC4A2 2016] buildingSMART International Ltd.: Industry Foundation Classes, Version 4 - Addendum 2 [Official]. <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/>, 24.09.2016.
- [IFC4A2 2016-AssAct] buildingSMART International Ltd.: Industry Foundation Classes, Version 4 - Addendum 2 [Official]. <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/schema/ifckernel/lexical/ifcrelassignstoactor.htm>, 31.12.2016.
- [IFC4A2 2016-Contain] buildingSMART International Ltd.: Industry Foundation Classes, Version 4 - Addendum 2 [Official]. <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/schema/ifcproductextension/lexical/ifcrelcontainedinspatialstructure.htm>, 01.01.2017.
- [IFC4A2 2016-Diagr] buildingSMART International Ltd.: Industry Foundation Classes, Version 4 - Addendum 2 [Official]. <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/schema/ifcproductextension/lexical/ifcrelcontainedinspatialstructure.htm>

- tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/link/annex-d.htm, 24.09.2016.
- [IFC4A2 2016-Door] buildingSMART International Ltd.: Industry Foundation Classes, Version 4 - Addendum 2 [Official]. <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/schema/ifcsharedbldgelements/lexical/ifcdoor.htm>, 29.12.2016.
- [IFC4A2 2016-DoorCom] buildingSMART International Ltd.: Industry Foundation Classes, Version 4 - Addendum 2 [Official]. http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/schema/ifcsharedbldgelements/pset/pset_doorcommon.htm, 29.12.2016.
- [IFC4A2 2016-Occu] buildingSMART International Ltd.: Industry Foundation Classes, Version 4 - Addendum 2 [Official]. http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/schema/ifcproductextension/pset/pset_spaceoccupancyrequirements.htm, 29.12.2016.
- [IFC4A2 2016-PropSet] buildingSMART International Ltd.: Industry Foundation Classes, Version 4 - Addendum 2 [Official]. <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/schema/ifckernel/lexical/ifcpropertyset.htm>, 01.01.2017.
- [IFC4A2 2016-Space] buildingSMART International Ltd.: Industry Foundation Classes, Version 4 - Addendum 2 [Official]. <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/schema/ifcproductextension/lexical/ifcspace.htm>, 24.09.2016.
- [IFC4A2 2016-Task] buildingSMART International Ltd.: Industry Foundation Classes, Version 4 - Addendum 2 [Official]. <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/schema/ifcprocessextension/lexical/ifctask.htm>, 31.12.2016.
- [IFC4A2 2016-TransEl] buildingSMART International Ltd.: Industry Foundation Classes, Version 4 - Addendum 2 [Official]. <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/Add2/html/schema/ifcproductextension/lexical/ifctransportelement.htm>, 11.06.2017.
- [Joedicke 1993] Joedicke: Entwerfen und Gestalten. Karl Krämer Verlag, 1993.
- [Joeng Ban 2011] Jeong SK, Ban YU: Computational algorithms to evaluate design solutions using Space Syntax. In: Journal Computer-Aided Design, 2011.
- [Köhler 2010] M. Köhler-Bußmeier: A Survey of Decidability Results for Elementary Object Systems. In: Proceedings of the International Workshop on Logic, Agents, and Mobility (LAM 2010), 2010.
- [Kraft 2007] Bodo Kraft: Semantische Unterstützung des konzeptuellen Gebäudeentwurfs. Dissertation, RWTH Aachen, 2007.
- [Kummer 2002] Olaf Kummer: Referenznetze. Logos-Verlag, 2002.
- [METIS-DFKI 2017] S. Bukhari: Forschungsprojekt METIS - Knowledge-based search and query methods for the development of semantic information models for use in early design phases. https://www.dfki.de/web/forschung/km/projekte/base_view?pid=908, 05.03.2017.
- [METIS-TUM 2017] F. Petzold, C. Langenhan: metis – Wissensbasierte Such- und Abfragemethoden für die Erschließung von Informationen in semantischen Modellen (BIM) für die Recherche in frühen Entwurfsphasen. <https://www.ar.tum.de/en/research-development/projects/metis-wissensbasierte-such-und-abfragemethoden-fuer-die-erschliessung-von-informationen-in-semantischen-modellen-bim-fuer-die-recherche-in-fruehen-entwurfsphasen/>, 05.03.2017.

- [Mitchell 1990] William J. Mitchell: The Logic of Architecture: Design, Computation, and Cognition. The MIT Press, 1990.
- [Moelle 2006] H. Moelle: Rechnergestützte Planungsprozesse der Entwurfsphasen des Architekten auf Basis semantischer Modelle. Dissertation, Technische Universität München, 2006.
- [Neufert 2016] E. Neufert: Bauentwurfslehre, 41. Auflage. Springer Vieweg, 2016.
- [OpenOffice 2017] Apache OpenOffice Org: Apache OpenOffice (TM): The Free and Open Productivity Suite. <https://www.openoffice.org>, 2017.
- [Pai 2002] H. Pai: The Portfolio and the Diagram. The MIT Press, 2002.
- [Petri] Wikipedia: Carl Adam Petri.
https://de.wikipedia.org/wiki/Carl_Adam_Petri, 25.01.2017.
- [Reisig 1985] Wolfgang Reisig: Systementwurf mit Netzen. Springer, 1985.
- [Reisig 1986] Wolfgang Reisig: Petrinetze: eine Einführung. Springer, 1986.
- [Renew 2015] Kummer, Wienberg, Duvigneau, Cabac: Renew - User Guide, Release 2.4.3. Technische Dokumentation, <http://www.renew.de>, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, 2015.
- [Renew Lizenz] Renew-Team, TGI, Uni Hamburg: License Terms.
<http://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/renew/license.html>, 13.11.2016.
- [Russell Elger 2008] Peter Russell, Dietrich Elger: The Meaning of BIM. In: Architecture 'in computro' - Integrating Methods and Techniques: 26th eCAADe Conference Proceedings. eCAADe: Conferences, 2008.
- [Schmitt 1993] G. Schmitt: Architectura et Machina: Computer Aided Architectural Design und Virtuelle Architektur. Vieweg, 1993.
- [Schwaiger 2002] Bärbel Schwaiger: Strukturelle und dynamische Modellierung von Gebäudebeständen. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2002.
- [Stapenhorst 2016] C. Stapenhorst: CONCEPT: A Dialogic Instrument in Architectural Design. jovis Verlag, 2016.
- [Steinmann 1997] Frank Steinmann: Modellbildung und computergestütztes Modellieren in frühen Phasen des architektonischen Entwurfs. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 1997.
- [UML 2016] Wikipedia: Unified Modeling Language.
https://de.wikipedia.org/wiki/Unified_Modeling_Language, 27.10.2016.
- [UML-Tools 2016] Wikipedia: List of Unified Modeling Language tools.
https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Unified_Modeling_Language_tools, 06.11.2016.
- [Valk 1998] Rüdiger Valk: Petri nets as token objects: An introduction to elementary object nets. In: ICATPN '98 Proceedings of the 19th International Conference on Application and Theory of Petri Nets, 1998.
- [Valk 2004] Rüdiger Valk: Object Petri Nets – Using the Nets-within-Nets Paradigm. In: Lecture Notes in Computer Science, 2004.
- [WinPetri 1993] M. Frank, V. Schmidt: WinPetri: Graphischer Editor, Simulations- und Analyseprogramm für S/T-Netze. <https://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets/classification/tools/winpetri.html>, 14.11.2016.