

Automatisierte Generierung von 3D-Gebäudemodellen aus vektorbasierten Grundrissplänen

DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

im Rahmen des Studiums

Medieninformatik

eingereicht von

Lukas Furlan

Matrikelnummer 0927111

an der Fakultät für Informatik

der Technischen Universität Wien

Betreuung: Priv. Doz. Mag. Dr. Hannes Kaufmann

Mitwirkung: Dipl.-Ing. Mag. Georg Gerstweiler

Wien, 10. Oktober 2016

Lukas Furlan

Hannes Kaufmann

Erklärung zur Verfassung der Arbeit

Lukas Furlan
Tanbruckgasse 8/28, 1120 Wien (A)

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst habe, dass ich die verwendeten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben habe und dass ich die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen –, die anderen Werken oder dem Internet im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Wien, 10. Oktober 2016

Lukas Furlan

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung der vorliegenden Diplomarbeit unterstützt haben.

Mein erster Dank gilt meinen Eltern Heinrich und Irma für die ständige Unterstützung und die Ermöglichung dieser Ausbildung.

Zudem möchte ich mich besonders bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Mag. Georg Gerstweiler bedanken. Durch viele Diskussionen hat er wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen und half mir bei Schwierigkeiten und Komplikationen einen klaren Blick zu bewahren.

Ein weiterer Dank gilt allen zur Seite stehenden Studienkollegen sowie Benedikt, Gottfried und Vanessa für die Bereitstellung der Testpläne.

Zuletzt bedanke ich mich bei meinen Freunden für ihre moralische Unterstützung und die willkommene Ablenkung von der Arbeit.

Kurzfassung

Grundrisspläne finden Anwendung im Bauwesen und beinhalten wichtige Informationen über das dargestellte Gebäude. Auch wenn die meisten dieser Pläne heutzutage digital erstellt und in einem Vektorformat gespeichert werden, so ist eine maschinelle Interpretation des semantischen Inhaltes dennoch nur eingeschränkt möglich. Begründen lässt sich diese Problematik insbesondere durch den Mangel eines allgemein gültigen Zeichenstandards. Ausschlaggebender Vorteil einer automatisierten Erfassung liegt in der effizienten Generierung von dreidimensionalen Gebäudemodellen. Unter anderem wird im Kontext der virtuellen Realität eine kostengünstige Grundlage für das realitätsbezogene Durchwandern von Gebäuden bereitgestellt. Ziel der vorliegenden Masterarbeit war die Entwicklung einer Applikation, um vektorbasierte Grundrisspläne automatisiert zu erfassen und strukturelle sowie topologische Informationen in Form eines dreidimensionalen Gebäudemodells für weitere Anwendungen interpretierbar bereitzustellen. Neben der Automatisierung des Systems spielen Generizität und Robustheit eine wesentliche Rolle und stellen als Kombination die primäre Herausforderung dar. Eine durchgeführte Analyse verschiedener Grundrisspläne schafft ein Regelwerk für die entwickelten strukturellen Methoden zum Erkennen der Gebäudebestandteile. Jede Methode wurde dabei iterativ verbessert und analysiert bis hin zu einer zufriedenstellenden Leistung. Dabei ist einem prioritären vollautomatisierten Ansatz eine halbautomatische Vorgehensweise untergeordnet, womit im entwickelten System ein akzeptabler Kompromiss zwischen Automatisierung und Generizität geschaffen wird. Die quantitative Evaluierung der Methoden mittels verschiedener Testpläne liefert zufriedenstellende Ergebnisse und mit dem System ist es möglich, durch minimale Eingriffe der Benutzer oder Benutzerinnen komplexe Pläne in kürzester Zeit zu analysieren.

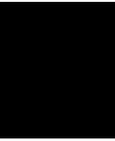
Abstract

Floor plans are commonly used in the construction industry and contain crucial information about the depicted building. For several years now, the creation of such plans has heavily relied on computer systems, storing relevant data in vector file formats. However, due to the many different graphical representations of symbols and the lack of a unified drawing standard, the automatic interpretation of the semantic information in these floor plans is still an open problem. The main benefit of automated acquisition of this information lies in the possibility to efficiently generate three-dimensional building models, which can then be employed for different purposes. The goal of this work was to design and develop a system for the automated interpretation of vector-based floor plans. Further, the system should be able to make structural and topological information in form of three-dimensional building models available for interpretation by other applications. Next to the autonomous operation of the system, genericity and robustness were key factors and made up the main problem statement. Different floor plans have been analysed to establish a compact set of rules, which go well together with the developed recognition methods. Each method devised was enhanced iteratively until a satisfactory level of performance had been achieved. This resulted in a fully automated approach supported by various underlying semiautomatic methods. This approach provides a reasonable compromise between automation and genericity. The concluding quantitative evaluation of the developed methods yielded compelling results. The system was able to analyse complex floor plans with minimal user interaction in a reasonable time.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	vii
Abstract	ix
Inhaltsverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Herausforderungen	2
1.3 Methodisches Vorgehen	3
1.4 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen	5
2.1 CAD-Systeme	5
2.2 Grundrisspläne	8
2.3 IFC-Datenmodell	10
2.4 Symbolerkennung	13
3 Verwandte Arbeiten	17
3.1 Symbolerkennung in technischen Zeichnungen	19
3.2 Generierung von 3D-Modellen aus CAD-Grundrissplänen	23
3.3 Generierung von 3D-Modellen aus Raster-Grundrissplänen	26
4 Analyse von Grundrissplänen	29
4.1 Wandöffnungen	31
4.2 Wände	34
4.3 Räume	38
4.4 Treppenhäuser	39
4.5 Balkone	39
5 Implementierung	41
5.1 Konzept	42
5.2 Graph Erzeugung	43
5.3 Erkennen von Wandöffnungen	47
	xi

5.3.1	Automatische Erkennung durch strukturelles Vorwissen	48
5.3.2	Halbautomatische Erkennung mittels Symbolvorlagen	53
5.4	Erkennen von Wänden	60
5.5	Erkennen von Räumen und Außenflächen	64
5.6	IFC-Export	69
5.7	Grafische Benutzeroberfläche	71
5.8	Ablaufdiagramm	75
5.9	Anforderungen an Grundrisspläne	76
6	Evaluierung	79
6.1	Studiendesign	79
6.2	Beschreibung der Testpläne	80
6.3	Diskussion der Resultate	81
6.3.1	Erkennung der Wandöffnungen	81
6.3.2	Erkennung der Wandflächen	85
6.3.3	Erkennung der Räume und Außenflächen	87
6.3.4	Notwendige Benutzerinteraktionen	88
6.3.5	Generierung der Symbolvorlagen	88
7	Zusammenfassung und Ausblick	91
7.1	Erweiterungen und zukünftige Verbesserungen	91
7.2	Zusammenfassung	92
A	Testpläne	95
	Abbildungsverzeichnis	105
	Tabellenverzeichnis	106
	Akronyme	109
	Literaturverzeichnis	111



Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Geometrische Informationen von Gebäuden können mittels vektorbasierten Grundrissplänen dargestellt werden. Solche technische Zeichnungen spielen im Bauwesen, insbesondere während der Bauplanung und Bauausführung, eine zentrale Rolle. Interpretiert werden diese Baupläne primär von menschlichen Akteuren, ein maschinelles Auslesen des semantischen Inhaltes ist nicht umfassend und nur eingeschränkt möglich. Der semantische Inhalt der Zeichnung umfasst dabei insbesondere geometrische Informationen von Gebäudeelementen sowie topologische Relationen. Eine solche Analyse stellt eine wichtige Grundlage für die Generierung von dreidimensionalen Modellen aus den entsprechenden zeichnerischen Inhalten dar. Begründet wird diese angesprochene Problematik einer automatischen maschinellen Interpretation besonders durch das Fehlen eines allgemein gültigen Zeichenstandards sowie eines definierten Aufbaus der Pläne. Inhalte können dadurch von Computern semantisch nicht immer eindeutig kategorisiert werden. Anders gesehen können Computer heutzutage noch nicht mit einem menschlichen Experten mithalten, welcher eine solche technische Zeichnung schneller und genauer interpretieren kann. Für den Experten stellt die visuelle Erfassung technischer Zeichnungen ein geringeres Problem dar, als auch in weiterer Folge das Erkennen von enthaltenen Mustern und Zusammenhängen. Schließlich bestehen diese Pläne aus einer Menge an farblich kodierten Mustern, welche sich aus Linien, Kurven und optional noch alphanumerischen Zeichen zusammensetzen. Die Komplexität verstärkt sich zudem durch einen variierenden Detaillierungsgrad dieser technischen Zeichnungen.

Personen werden heutzutage durch mächtige Anwendungen beim Zeichnen von Grundrissplänen unterstützt. Jedoch können Zeichenfehler deshalb nicht ausgeschlossen werden, was wiederum das Problem einer maschinellen Interpretation der Zeichnungen verstärkt. Neben einem unsauberen und fehlerbehafteten Arbeiten entstehen solche Fehler vor allem durch die notwendige Konvertierung der Grundrisspläne aus anwendungsspezifischen

Projektdateien in extern interpretierbare Dateiformate. Abgesehen davon liegt der Einsatzbereich solcher professionellen Programme nicht in der Generierung dreidimensionaler Modelldaten aus bereits existierenden Grundrissplänen. Ebenso ist für die maschinelle Interpretation solcher Zeichnungen keine geeignete Funktionalität integriert.

Vorteil einer maschinellen Auswertung semantischer Informationen von vektorbasierten Grundrissplänen liegt insbesondere in der effizienten und kostengünstigen Generierung dreidimensionaler Gebäudemodelle. Aktuell erfordert die Entwicklung eines dreidimensionalen Modells einen hohen Zeitaufwand, gekoppelt mit intensivem Einsatz seitens des Anwenders oder der Anwenderin und erfolgt meist mit einer eigens dafür konzipierten Software. Nachträgliche Änderungen an einem 3D-Modell lassen sich ebenfalls nicht immer effizient durchführen. Die resultierenden digitalen Gebäudemodelle können für eine Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten herangezogen werden. Beispielsweise können die Gebäudebestandteile in einem Grundrissplan einer Wohnung maschinell erkannt werden sowie Beleuchtung und Texturierung der extrudierten 3D-Objekte anschließend automatisch und bestimmte Präferenzen des Anwenders oder der Anwenderin berücksichtigend generiert werden. Das finale Gebäudemodell kann daraufhin in einer virtuellen Realität unter Einsatz eines Head-Mounted Displays (HMD) wirklichkeitsnah betrachtet und durchwandert werden. Personen erhalten eine realistische Vorstellung und einen umfassenden Einblick in das Gebäudeinnere. Dies ermöglicht unter anderem Probleme verschiedenster Art frühzeitig zu erkennen und kostengünstig auszubessern. Ein weiterer Einsatzbereich dieser Modelle liegt bei digitalen Spielen für die effiziente als auch realitätsbezogene Generierung von Gebäuden und Spielwelten. Ebenso können die 3D-Gebäudemodelle für unterschiedliche Computersimulationen wie beispielsweise Beleuchtungs-, Akustik- oder Feuersimulationen eingesetzt werden.

1.2 Zielsetzung und Herausforderungen

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist die Entwicklung einer Software-Komponente, mit welcher digitale Bauzeichnungen im Vektorformat eingelesen und semantisch analysiert werden können. Die Bauzeichnung stellt dabei den Grundriss eines Gebäudes oder Gebäudeteils dar. Darauf aufbauend erfolgt die automatisierte Generierung eines dreidimensionalen Modells, welches den geometrischen Informationen der Bauzeichnung entspricht. Grundrisspläne, welche in weit verbreitete und geläufige Dateiformate vorliegen, sollen unterstützt werden. Die generierten Gebäudemodelle sollen extern interpretierbar gespeichert werden. Eine Visualisierung und Verarbeitung der 3D-Modelle wird damit durch bereits existierende Betrachtungsprogramme sichergestellt. Unter anderem können mit solchen Applikationen interne oder externe Wandflächen als auch Fensterflächen berechnet werden. Diese Informationen können anschließend beispielsweise für Kostenkalkulationen einer Renovierung herangezogen werden. Zusätzlich können die Daten der generierten Gebäudemodelle darüber hinaus auch durch eigens angefertigte Programme individualisiert verarbeitet werden. Besonderes Augenmerk bei der Entwicklung der Anwendung gilt dabei einer unkomplizierten und ungehinderten Weiterverarbeitung der erzeugten Gebäudemodelle für Anwendungen im Bereich der virtuellen Realität. Neben

der verlustfreien Weitergabe geometrischer Gebäudedaten muss die topologische Struktur der erkannten Gebäudeelemente vorhanden und auslesbar sein. Unter anderem beinhaltet dies die Zuordnung von Fenstern und Türen zu ihren umliegenden Wänden und die Gruppierung von Wandflächen hinsichtlich zugehöriger Räumlichkeiten.

Dieser Prozess der Modellgenerierung aus Grundrissplänen soll dabei maßgeblich automatisiert ablaufen und eine große Variation an Grundrissplänen unterstützen. Schwerpunkt liegt dabei bei der Erkennung von Wänden, Türen und Fenstern, wodurch die grundlegende strukturelle und funktionale Zusammensetzung eines Gebäudes wiedergegeben werden kann. Zusätzlich soll eine geeignete grafische Benutzeroberfläche manuelle Eingriffe und Korrekturen effizient ermöglichen und dem Anwender oder der Anwenderin visuelle Hinweise über den Erkennungsprozess liefern.

Die größte Schwierigkeit bei der Interpretation von Grundrisszeichnungen ist auf den bereits angeführten fehlenden Zeichenstandard zurückzuführen. Erschwert wird diese automatische Erfassung der Grundrisse durch den Mangel einer eindeutigen Struktur und dem variierenden Inhalt der Pläne. Daneben sind für eine automatische Generierung dreidimensionaler Modelle Höheninformationen aus den zweidimensionalen Plänen nicht auslesbar. Fundamentale Herausforderung besteht somit darin, einen geeigneten und für den praktischen Nutzen akzeptablen Kompromiss zwischen Effizienz, Generizität und Automation bei der Extraktion relevanter Informationen aus Grundrissplänen zu erarbeiten.

1.3 Methodisches Vorgehen

Zunächst muss ein Überblick als auch ein tiefgreifendes Verständnis hinsichtlich des theoretischen Hintergrundes zu dieser Thematik geschaffen werden. Dies beinhaltet unter anderem einen Vergleich und eine Beurteilung von bereits bestehenden Methoden und Systemen als Teil einer Literaturrecherche. Darüber hinaus ist zudem eine profunde Auseinandersetzung mit Grundrissplänen notwendig. Eine Analyse und Untersuchung der Inhalte solcher technischen Zeichnungen ist ausschlaggebend für die anschließende Konzipierung der Algorithmen und Methoden. Insbesondere um detaillierte und von den Plänen nicht abweichende Ergebnisse zu erzielen, stützt sich die Arbeit auf ein digitales Vektorformat der zu verarbeitenden Grundrisszeichnungen. Dennoch kann eine detailgetreue und fehlerfreie Vektorisierung dem entwickelten System vorgeschaltet werden, womit für Rastergrafiken (pixelorientierte Zeichnungen) ein legitimes Eingabeformat bereitgestellt wird. Vor allem für den Import dieser Eingabedaten im Vektorformat als auch für den Export der generierten Modelle durch ein extern interpretierbares Format müssen im Zuge einer Software-Recherche geeignete Softwarebibliotheken gesammelt und getestet werden. Daraufhin folgt die Entwicklung der Software-Komponente in Form von graduell durchgeführten Erweiterungen und Optimierungen. Jede Methode wird dabei iterativ verbessert und analysiert bis hin zu einer zufriedenstellenden Leistung. Vorgegebene Bedingungen als auch neu gewonnene Erkenntnisse werden dabei miteinbezogen und haben Einfluss auf die finale Applikation. Die entworfenen Methoden werden abschließend

mittels verschiedener Testpläne evaluiert.

1.4 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 Grundlagen werden für diese Arbeit fundamentale Thematiken angesprochen und bieten der Leserschaft damit das notwendige Hintergrundwissen für die restliche Arbeit. Grundrisspläne von Gebäuden, welche die Eingabedaten der entwickelten Anwendung bilden, als auch Softwaresysteme für die digitale Erzeugung solcher Zeichnungen werden näher beschrieben. Ebenso wird auf das verwendete Datenmodell für das Speichern gebäuderelevanter Informationen eingegangen und ein grundlegender Überblick über die Symbolerkennung in graphischen Dokumenten geliefert.

Kapitel 3 Verwandte Arbeiten fasst verschiedene Arbeiten zusammen, welche sich mit verwandten Themengebieten und wichtigen Teilbereichen des zu entwickelnden Systems beschäftigen. Für die zu erreichende Zielsetzung werden dabei interessante Ansätze näher diskutiert und hervorgehoben. Dies umschließt insbesondere Methoden und Vorgehensweisen, um aus Grundrissplänen relevante Informationen für die Erzeugung digitaler Gebäudemodelle zu extrahieren. Wichtige Aspekte sind dabei Automation, Generizität und Robustheit der entsprechenden Systeme.

Die Problematik der automatischen Generierung dreidimensionaler Gebäudemodelle aus eingelesenen Grundrisszeichnungen wird in Kapitel 4 Analyse von Grundrissplänen anhand unterschiedlicher Pläne und deren Charakteristiken genauer untersucht. Ergebnis dieser Analyse sind häufig in Grundrissplänen vorhandene Merkmale, welche für die anschließend entwickelten Algorithmen und Prozesse herangezogen werden. Erschwert wird das Festlegen und Auffinden solcher Gemeinsamkeiten durch strukturelle und inhaltliche Abweichungen der Grundrisse infolge unterschiedlicher Verwendungen der Pläne sowie aufgrund des Mangels eines eindeutigen Zeichenstandards.

Aufbauend auf diese Analyse der Grundrisspläne folgt in Kapitel 5 Implementierung eine strukturierte und übersichtliche Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise der entwickelten Applikation *CAD2IFC*. Fundamentale Konzepte und Ansätze werden der Leserschaft dabei näher gebracht. Eine automatisierte und generische Vorgehensweise bei der Erfassung des geometrischen und semantischen Inhaltes der Grundrisspläne steht dabei im Vordergrund.

In Kapitel 6 Evaluierung wird das entwickelte System mittels unterschiedlicher Grundrisspläne getestet. Testpläne verschiedener Personen werden für diese Evaluierung herangezogen. Untersucht wird insbesondere der Automatisierungsgrad des Systems als auch die Qualität der resultierenden Gebäudemodelle.

Die Arbeit wird in Kapitel 7 Zusammenfassung und Ausblick resümiert und mit weiterführenden und nicht behandelten Sachverhalten abgeschlossen.

Grundlagen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit für diese Arbeit relevanten grundlegenden Thematiken. Der Leserschaft soll damit das notwendige Hintergrundwissen für die anschließenden Kapitel dieser Arbeit mitgeteilt werden. Zunächst erfolgt in Abschnitt 2.1 CAD-Systeme eine allgemeine Definition und Beschreibung von Applikationen für die digitale Erzeugung technischer Pläne. Solche Systeme bilden heutzutage einen wichtigen Bestandteil in unterschiedlichen Branchen, wie unter anderem im Bauwesen. Anschließend wird darauf aufbauend in Abschnitt 2.2 Grundrisspläne näher auf Grundrisspläne eingegangen. Diese Zeichnungen können als vektorisierte Form mit den vorher beschriebenen Systemen erzeugt werden und stellen die Eingabedaten des zu entwickelnden Systems dar. In Abschnitt 2.3 IFC-Datenmodell wird abschließend das IFC-Datenmodell und dessen Einsatzgebiete näher beleuchtet. Die entwickelte Applikation beschreibt mit diesem Datenmodell Gebäudebestandteile, die zuvor aus den eingelesenen Grundrissplänen extrahiert wurden. Abschließend werden in Abschnitt 2.4 Symbolerkennung grundlegende Ansätze und Vorgehensweisen für die Erkennung von Symbolen in graphischen Dokumenten angesprochen.

Für einen umfangreichen und fundierten Einblick in die vorgestellten Sachverhalte wird für die interessierte Leserschaft an geeigneten Stellen auf zusätzliche Literatur verwiesen.

2.1 CAD-Systeme

Der Begriff CAD steht als Abkürzung für den englischen Ausdruck Computer-Aided Design oder auch Computer-Aided Drafting (zu Deutsch rechnerunterstütztes Konstruieren) und hat heutzutage die traditionelle manuelle Erstellung von technischen Zeichnungen wie Grundrisspläne im Bauwesen oder Schnittzeichnungen im Maschinenbau nahezu abgelöst. Begründet wird dies durch die fortschreitende Verbesserung der Computertechnologien und die damit ermöglichte Steigerung der Produktivität des Zeichners sowie

der Qualität der Zeichnungen. Zudem ermöglicht die rechnergestützte Vorgehensweise neuartige Analysen und Optimierungen [SRN08][KW10].

Neben der notwendigen Hardware (Computereinheit sowie Ein- und Ausgabegeräte) besteht ein CAD-System zudem aus einer CAD-Applikation. Labisch und Weber [LW13] beschreiben diese Anwendungen als „[...] ein *Verwaltungsprogramm, welches die Eingabe von Daten erlaubt (Eingabebaustein), diese Eingaben in bestimmter Weise verarbeitet, manipuliert, verknüpft (Algorithmenteil) und diese so veränderten Daten hilft auszugeben (Ausgabebaustein). Den Kern der Software stellt die Datenbasis dar, die darin abgelegten Daten ergeben das als CAD-Modell bezeichnete Abbild (rechnerinternes Modell, RIM) des realen Produktes. Unterstützend kann ein Speicher sein, wo auf vorbereitete Informationen zurückgegriffen werden kann (Datenbank) [...]*“.

Unterschieden wird dabei zwischen Applikationen für linien-, flächen- oder volumenbasierte CAD-Systeme [LW13] [KW10]:

- *Linienbasierte Systeme* verwenden ausschließlich Punkte und Linien (schließt Kurven und Kreise mit ein) als geometrische Grundelemente. Dies impliziert, dass Flächen- oder Volumenoperationen nicht durchgeführt werden können. Wird im zweidimensionalen Raum gearbeitet, so müssen verschiedene Ansichten eines Objektes unabhängig voneinander erzeugt werden. Prinzipiell wird mit einem solchen System lediglich die jeweilige technische Zeichnung erstellt (*zeichnungsorientiertes Prinzip*). Wird beispielsweise die Vorderansicht des Objektes abgeändert, so müssen alle weiteren Ansichten (etwa Seiten- und Draufsicht) ebenfalls manuell abgeändert werden, um eine Konsistenz zwischen den unterschiedlichen Ansichten zu gewährleisten. Jedoch sind linienbasierte Systeme nicht zwingend auf zwei Dimensionen beschränkt. Die Weiterentwicklung dieser 2D-CAD-Systeme erlaubt die Tiefe als dritte Dimension abzuspeichern. Ausschlaggebender Vorteil der sogenannten 2- $\frac{1}{2}$ D-CAD-Systeme ist dabei das Erzeugen von räumlichen Gebilden (Drahtmodell genannt), wodurch unter anderem ein nachträgliches Abändern des Blickwinkels für verschiedene Ansichten ermöglicht wird. Durch das Hinzufügen der dritten Dimension findet ein Wandel vom zeichnungsorientierten Prinzip hin zu einem *werkstücksorientierten Prinzip* statt.
- *Flächenbasierte Systeme* erweitern das linienbasierte System um ein zusätzliches Grundelement, die Fläche. Nicht sichtbare Bestandteile können damit ausgeblendet werden, jedoch ist die Berechnung physischer Informationen nur eingeschränkt möglich.
- *Volumenbasierte Systeme* repräsentieren das dargestellte Objekt geometrisch vollständig und besitzen neben einer Oberfläche auch ein Volumen. Wesentlicher Vorteil dieser 3D-CAD-Systeme ist dabei die Möglichkeit, das Objekt aus beliebigen Blickwinkeln zu betrachten und eine Vielzahl an zusätzlichen Berechnungen durchzuführen. Als Beispiel seien Booleschen Verknüpfungen von Körpern und physikalische Berechnungen wie die Wärmedehnung genannt.

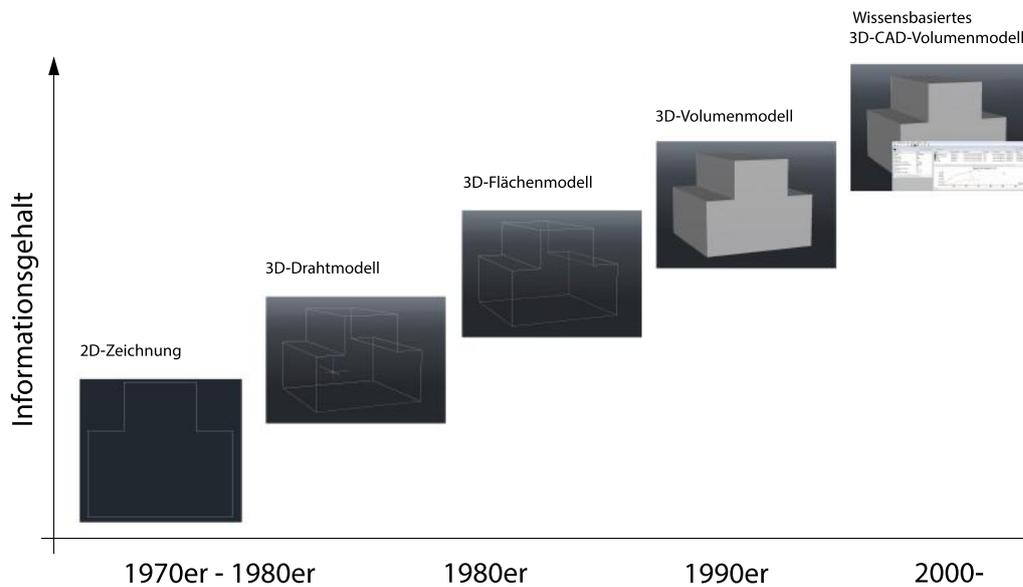


Abbildung 2.1: Entwicklung der geometrischen Modelle in CAD-Applikationen. In Anlehnung an [Ste06]

Diese Unterscheidung der Applikationen ist zunächst historisch begründet (siehe Abbildung 2.1), da mit zunehmendem Funktionsumfang die Komplexität der Software als auch die Bedingungen an die Hardware steigen. Daneben spielen auch die unterschiedlichen Anwendungsgebiete von CAD-Systemen und deren Anforderungen eine Rolle. Aktuell bieten die meisten modernen CAD-Applikationen ein Arbeiten in allen drei Dimensionen an. Für traditionelle technische Zeichnungen ist ein Konstruieren in zwei Dimensionen ausreichend. Solche zweidimensionalen Schnitte und Ansichten können zudem jedoch auch aus dreidimensionalen Modellzeichnungen abgeleitet werden [KW10].

CAD-Systeme finden heutzutage in vielen unterschiedlichen Branchen Anwendung und werden meist einem bestimmten Aufgabenbereich und den vorherrschenden Bedingungen angepasst. Insbesondere im Bauwesen und im Maschinenbau kann auf eine Reihe verschiedenster Systeme zurückgegriffen werden. Für eine umfangreiche Liste von CAD-Programmen und ihrer Anwendungsgebiete wird auf [CAx] verwiesen. In Zusammenhang mit dieser Arbeit sind besonders moderne 3D-CAD-Systeme interessant und ermöglichen die Erzeugung von Grundrissplänen mit integrierten Informationen für eine dreidimensionale Darstellung des jeweiligen Gebäudes. Dennoch sei angemerkt, dass die Funktionsweise dieser Programme eine automatische Generierung von 3D-Modellen aus konventionellen Grundrissplänen nicht unterstützt, sondern ein manuelles Nachzeichnen der Pläne impliziert wird.

2.2 Grundrisspläne

Grundrisspläne sind technische Zeichnungen und finden Anwendung im Bauwesen, meist im Zuge der Bauplanung oder der Bauausführung. Dabei repräsentiert der Grundrissplan eine der ausschlaggebendsten Bauzeichnungen und beinhaltet wichtige Informationen bezüglich dem Aufbau und der Struktur eines Gebäudes. Ein Grundrissplan bildet ein Gebäude (oft auch nur ein Teil eines Gebäudes) abstrahiert und zweidimensional ab. Gewählt wird dabei eine senkrechte Ansicht auf das Gebäude. Zentrales Merkmal stellt die horizontale Schnittebene dar, welche das Gebäude auf einer bestimmten Höhe durchschneidet. In den meisten Fällen erfolgt dieser Schnitt auf einer Höhe von ungefähr 1.2 Meter (ungefähr 4 Fuß) über den Fußboden, durchschneidet Türen und die meisten Fenster und liefert damit umfangreiche und zweckentsprechende Informationen über die Gebäudestruktur. Für mehrstöckige Gebäude ist es notwendig, einen Grundrissplan für jedes Stockwerk anzulegen. Zudem sind Höheninformationen der einzelnen Gebäudeelemente aus Grundrisszeichnungen nicht auslesbar und müssen für die Generierung der 3D-Modelle anderweitig ermittelt werden [KK11].

Abbildung 2.2 verdeutlicht einen einfachen Grundrissplan eines Stockwerkes. Wandöffnungen wie Türen, Fenster und sonstige Durchgänge werden durch entsprechende Symbole visualisiert, Wände in diesem Fall durch grau gefüllte Flächen. Die grafische Repräsentation der Gebäudebestandteile wird durch zusätzliche semantische Informationen ergänzt. Neben Maßeintragungen für die einzelnen Wandsegmente lässt sich für jeden Raum die entsprechende Raumbezeichnung und Raumfläche auslesen. Farbe, Dicke und Art der Linien unterstützen die visuelle Trennung der unterschiedlichen Informationen über das Gebäude.

Grundrisspläne werden heutzutage in den meisten Fällen digital mit CAD-Applikationen erstellt und liegen in einem vektorbasierten Datenformat vor. Zu den bekanntesten kommerziellen Produkten gehören unter anderem AutoCad¹ und ArchiCad², deren Funktionsumfang weit über das Erstellen von reinen Grundrissplänen hinausgeht. Moderne 3D-CAD-Applikationen wie diese erlauben die Integration von zusätzlichen semantischen Informationen über das Gebäude und ermöglichen dadurch etwa eine dreidimensionale Modelldarstellung. In den meisten Fällen erfolgt das digitale Erstellen eines Grundrissplans jedoch dem zeichnungsorientierten Prinzip. Dabei besteht die Zeichnung prinzipiell aus einer Menge an Linien, Kreisbögen und alphanumerische Zeichen und wird primär von menschlichen Akteuren interpretiert. Eine maschinelle Analyse des semantischen Inhaltes dieser Pläne ist nicht, beziehungsweise nur eingeschränkt möglich. Mit semantischem Inhalt ist dabei insbesondere die Erkennung der verschiedenen Gebäudeelemente wie Türen und Wände sowie die topologischen Beziehungen dieser Objekte gemeint. Eine solche Analyse stellt eine wichtige Grundlage für die Generierung von dreidimensionalen Modellen aus Grundrisszeichnungen dar. Begründet wird diese Problematik einer maschinellen Verarbeitung vor allem durch das Fehlen eines Zeichenstandards und einem

¹<http://www.autodesk.com/products/autocad/overview>, zuletzt Zugriffen am 13.07.2016

²<http://www.graphisoft.com/archicad>, zuletzt Zugriffen am 13.07.2016

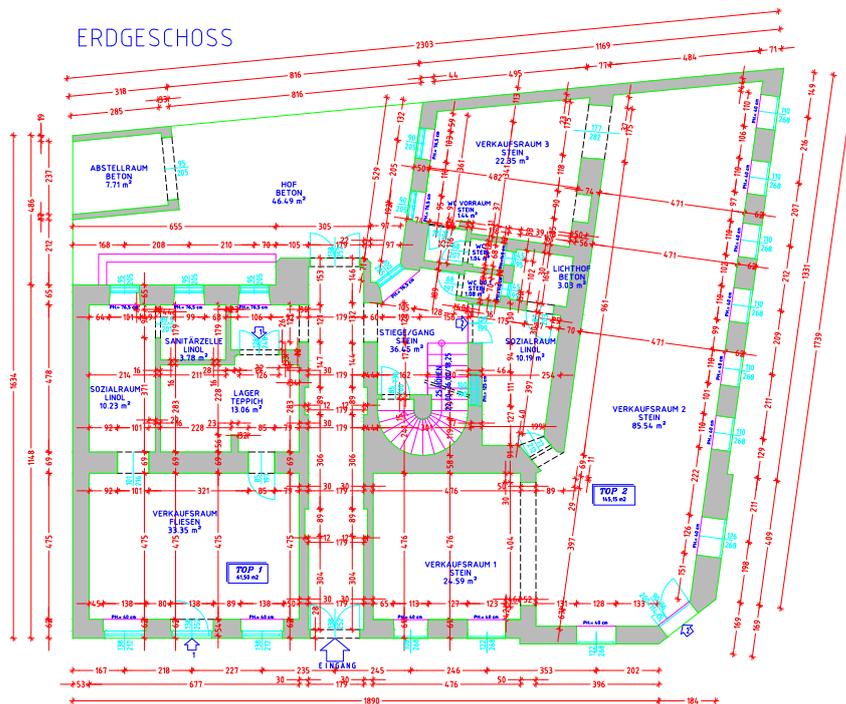


Abbildung 2.2: Beispiel eines Grundrissplans von einem Stockwerk, erstellt mit einer CAD-Applikation.

definierten Aufbau der Grundrisspläne, wodurch verschiedene Inhalte einer Zeichnung vom Computer semantisch nicht eindeutig kategorisiert werden können. In diesem Zusammenhang kommen Computer heutzutage noch nicht einem menschlichen Experten gleich, welcher einen Bauplan schneller und genauer interpretiert. Für den Experten stellt die visuelle Erfassung eines Bauplanes ein geringeres Problem dar sowie in weiterer Folge die Erkennung von Mustern und inhaltlichen Zusammenhängen.

Für das Speichern und Laden der Zeichnungen greifen die meisten CAD-Systeme primär auf native Datenformate zurück, unterstützen dafür oft zusätzlich auch extern interpretierbare Schnittstellenformate. Für zweidimensionale Zeichnungsdaten (jedoch nicht darauf beschränkt) setzte sich das DXF (Abkürzung für Drawing Interchange Format oder Drawing Exchange Format) als nicht offiziellen Industriestandard durch. Das DXF-Format wurde von Autodesk entwickelt und ist offen dokumentiert³. Mit steigendem Funktionsumfang und komplexeren Objektstrukturen verlor DXF in den letzten Jahren an Bedeutung, weshalb viele Applikationen zudem das lizenzpflichtige und proprietäre DWG-Datenformat von AutoCAD integrieren [LW13] [SRN08].

³Das aktuellste offizielle DXF-Nachschlagewerk findet sich unter http://images.autodesk.com/adsk/files/autocad_2013_pdf_dxf_reference_enu.pdf, zuletzt Zugriffen am 27.06.2016

Abschließend seien an dieser Stelle noch zwei fundamentale Funktionen von CAD-Systemen angeführt und zwar das Arbeiten mit Ebenen und das Anwenden von Blockelementen (Blöcke). Ebenen ermöglichen die Aufteilung des Zeicheninhaltes in mehrere unabhängige und übereinandergelegte Schichten. Inhalte können dadurch gut strukturiert hinzugefügt werden und lassen sich nach Belieben auch ein- und ausblenden. Beispielsweise können dekorative Elemente wie Einrichtungsgegenstände oder die Bemaßung auf eigene Ebenen gelegt werden. Dem Zeichner oder der Zeichnerin ist dabei freigelassen, ob und in welcher Art und Weise Ebenen eingesetzt werden. Blöcke definieren eine Vorlage bestehend aus beliebigen Zeichenelementen wie Linien oder Kreisbögen. Durch eine solche Konstellation lässt sich zum Beispiel die grafische Repräsentation eines Fensters definieren und der entsprechende Block kann anschließend beliebig oft mit einer bestimmten Skalierung und Drehung in die Zeichnung eingefügt werden. Neben dem Erstellen eigener Blöcke kann der Anwender oder die Anwenderin bei vielen CAD-Applikationen zudem auf bereits existierende Bibliotheken von Blöcken zugreifen. Ebenen und Blöcke können die automatische Analyse von Grundrissplänen deutlich vereinfachen. Jedoch wird dafür eine für den Computer nachvollziehbare Verwendung dieser Funktionen unumgänglich. Insbesondere ist dafür eine einheitliche textuelle Bezeichnung als auch eine sinnvolle Strukturierung dieser Ebenen und Blockinhalte notwendig.

2.3 IFC-Datenmodell

Das Akronym IFC steht für den englischen Ausdruck Industry Foundation Classes und bezeichnet einen offenen und herstellerneutralen Standard im Bauwesen. Das objektorientierte Datenmodell ermöglicht den Austausch von digitalen Gebäudemodellen, welche sich aus einer semantischen Beschreibung und einer geometrischen Repräsentation des Bauwerkes zusammensetzen. Die IFC wurden von der Non-Profit-Organisation buildingSMART (ursprünglich unter dem Namen Internationale Allianz für Interoperabilität, oder kurz IAI) entwickelt und sind seit 2013 unter ISO 16739 registriert und standardisiert. Abbildung 2.3 visualisiert die Versionsgeschichte des Modells, wobei die erste Version IFC 1.0 1997 und die aktuellste Version IFC 4 2013 veröffentlicht wurden. Version IFC 5 ist zurzeit in Planung. Aktuell wird für die meisten Angelegenheiten mit den Versionen IFC 2x3 und IFC 4 gearbeitet [IFC].

BuildingSMART bezeichnet die IFC als einzigen wirklichen offenen Standard für BIM. BIM steht als Abkürzung für den englischen Begriff Building Information Modeling (zu Deutsch Gebäudedatenmodellierung) und beschreibt ein Konzept für die durchgängige Nutzung digitaler Bauwerksmodelle für alle Bereiche des Bauwesens. Die Grundlage dieser modellbasierten Planungsmethode bildet ein 3D-Modell aus attribuierten Bauteilen, beispielsweise durch die IFC beschrieben. Informationsbrüche sollen durch eine durchgängige Nutzung und verlustfreie Weitergabe eines solchen digitalen Gebäudemodells über den gesamten Lebenszyklus des Bauvorhabens vermieden werden. Die Zusammenarbeit und Kommunikation zwischen den verschiedenen Akteuren (etwa Architekt, Fachingenieur und Bauherr) sowie den beteiligten Unternehmen im Bauwesen soll durch diesen zentralen

Austausch verbessert und hervorgehoben werden und impliziert somit eine Steigerung der Produktivität bei gleichzeitiger Verringerung von Problemen und Schwierigkeiten.

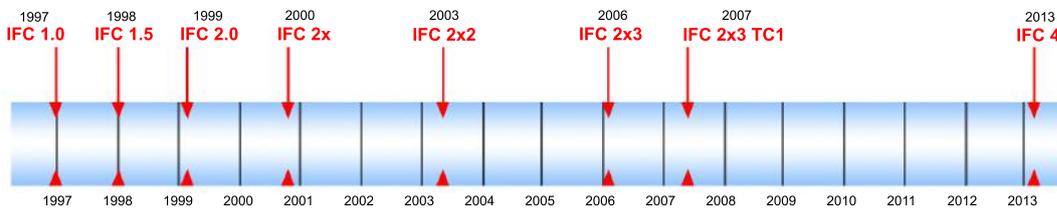


Abbildung 2.3: Versionsgeschichte des IFC-Datenmodells.

Im Kontext dieser Arbeit wird das IFC-Datenmodell verwendet, um den grundlegenden strukturellen Aufbau eines Gebäudes zu beschreiben. Dies beinhaltet insbesondere die geometrische Repräsentation von Wänden und Wandöffnungen wie Türen und Fenster. Der Abstraktionsgrad ist dabei hoch, auch wenn die IFC eine detaillierte und umfassende Beschreibung von Bauwerken und deren Bestandteile erlaubt. Relevant sind in diesem Zusammenhang lediglich die Informationen für eine dreidimensionale Darstellung des entsprechenden Gebäudes sowie Informationen über den topologischen Aufbau der enthaltenen Gebäudeelemente. Abbildung 2.4 verdeutlicht anhand des Screenshots des IFC-Betrachtungsprogramms BIM Vision⁴ den semantischen und geometrischen Inhalt eines solchen einfachen IFC-Gebäudemodells. Die Abbildung zeigt zunächst im rechten Bereich die hierarchische Struktur des einstöckigen Gebäudes. In der Mitte des Betrachtungsprogrammes wird die geometrische Repräsentation visualisiert. Die Decke des Stockwerkes wurde für eine aussagekräftigere Darstellung ausgeblendet. Im Bereich links davon werden einige Eigenschaften des aktuell ausgewählten Fensters aufgelistet. Diese grafische Wiedergabe ergänzend beinhaltet Tabelle 2.1 einen Ausschnitt des Quelltextes des Gebäudemodells und verdeutlicht den Unterschied zwischen den Dateiformaten IFC-SPF und IFC-XML. IFC-SPF definiert Objekte zeilenweise und weist damit eine kompakte, aber dennoch lesbare Struktur auf. IFC-XML basiert auf den XML-Standard und ist daher mit XML-Tools kompatibel. Nachteilig sei neben einer schlechteren Lesbarkeit die Generierung von großen Dateien angemerkt, weshalb dieses Format in der Praxis seltener Anwendung findet.

Da das IFC-Datenmodell sehr umfangreich und komplex ist, wird an dieser Stelle nicht weiter auf die semantische Beschreibung der Gebäudebestandteile und auf die verschiedenen Möglichkeiten der geometrischen Repräsentation dieser Objekte eingegangen. Stattdessen wird auf weiterführende Literatur verwiesen [BKKB15].

⁴<http://www.bimvision.eu/uber-2/> zuletzt Zugriffen am 04.08.2016

Tabelle 2.1: Ausschnitt des Quelltextes von dem in Abbildung 2.4 gezeigten Gebäudemodell. Der Ausschnitt verdeutlicht die geometrische Repräsentation einer Wand im IFC-SPF und IFC-XML Format. Bei IFC-XML sind insgesamt weitere 156 Zeilen Quelltext notwendig, um verglichen mit IFC-SPF die identische Menge an Informationen wiederzugeben.

IFC-SPF

```
#794 = IFCWALL('{6/.../0}', #2, 'Bezeichnung', 'Beschreibung', $, #795, #800, $);
#795 = IFCLOCALPLACEMENT(#38, #796);
#796 = IFCAXIS2PLACEMENT3D(#797, #798, #799);
#797 = IFCCARTESIANPOINT((0., 0., 0.));
#798 = IFCDIRECTION((0., 0., 1.));
#799 = IFCDIRECTION((1., 0., 0.));
#800 = IFCPRODUCTDEFINITIONSHAPE($, $, (#801));
#801 = IFCSHAPEREPRESENTATION(#20, 'Body', 'SweptSolid', (#802));
#802 = IFCEXTRUDEDAREASOLID(#803, #811, #815, 2.5);
#803 = IFCARBITRARYCLOSEDPROFILEDEF(.AREA., $, #804);
#804 = IFC2DCOMPOSITECURVE((#805), $);
#805 = IFCCOMPOSITECURVESEGMENT(.CONTINUOUS., .T., #806);
#806 = IFCPOLYLINE((#807, #808, #809, #810));
#807 = IFCCARTESIANPOINT((97.5651873202809, -107.474236776845));
#808 = IFCCARTESIANPOINT((97.5651873202809, -113.152020899335));
#809 = IFCCARTESIANPOINT((97.8651873202809, -113.702020899335));
#810 = IFCCARTESIANPOINT((97.8651873202809, -107.024236776845));
#811 = IFCAXIS2PLACEMENT3D(#812, #813, #814);
#812 = IFCCARTESIANPOINT((0., 0., 0.));
#813 = IFCDIRECTION((0., 0., 1.));
#814 = IFCDIRECTION((1., 0., 0.));
#815 = IFCDIRECTION((0., 0., 1.));
```

IFC-XML

```
<IfcWall id=i638">
  <GlobalId>{6bac4263-d6ad-4419-b33f-b3563e979250}</GlobalId>
  <OwnerHistory>
    <IfcOwnerHistory xsi:nil="true"ref=i2"/>
  </OwnerHistory>
  <Name>Bezeichnung der Wand</Name>
  <Description>Beschreibung der Wand</Description>
  <ObjectPlacement>
    <IfcLocalPlacement xsi:nil="true"ref=i639"/>
  </ObjectPlacement>
  <Representation>
    <IfcProductDefinitionShape xsi:nil="true"ref=i644"/>
  </Representation>
</IfcWall>
```

skriptoren genannt) sowie darauf basierend das Auffinden der Symbole durch Erkennen von Mustern. Dies geschieht oft in Zusammenhang mit komplexen statistischen Methoden und maschinellem Lernen als auch unter einfacheren Umständen mit Distanz- und Ähnlichkeitsberechnungen. Solche Methoden werden unter dem Begriff der *statistischen Ansätze* zusammengefasst. Gerade beim Arbeiten mit CAD-Plänen wird auf Grund der bereits enthaltenen geometrischen Informationen für die Erkennung von Mustern oft auf strukturelle Vergleiche zurückgegriffen (*strukturelle Ansätze*). Im Folgenden ist eine genauere Beschreibung und Kategorisierung der verschiedenen Vorgehensweisen für die Erfassung numerischer Merkmale von Symbolen angeführt [TT14]:

- *Pixelbasierte Deskriptoren*: Bei diesen Methoden werden Merkmale von Symbolen direkt aus den Daten der Rastergrafiken errechnet. Darunter fallen einfache Eigenschaften wie die Euler Zahl, Anzahl an Zusammenhangskomponenten oder die Rundheit. Als Beispiel komplexerer Deskriptoren sei SIFT (Abkürzung für Scale-Invariant Feature Transform) und die Fourier-Transformation angeführt. Errechnete Merkmale eines graphischen Symbols werden hierbei anhand eines Merkmalsvektors (Englisch feature vector) beschrieben und ein statistischer Klassifikator wird für den anschließenden Erkennungsprozess angewendet.
- *Strukturelle Deskriptoren*: Diese Methoden beschreiben Relationen zwischen elementaren Teilen (auch Primitive genannt) eines Symbols. Solche Primitive sind meistens Linien, Kreisbögen und alphanumerische Zeichenfolgen. Als Relation können beispielsweise Längenvergleiche, die Art der Nachbarschaft oder räumliche Zusammenhänge definiert werden. So können Linien mit einem bestimmten Abstand parallel zueinander vorkommen, sich überschneiden oder denselben Endpunkt besitzen. Diese Art von Informationen wird oft durch eine Graphenstruktur repräsentiert und Symbole werden durch Auffinden von Teilstrukturen in Graphen erkannt. Neben diesen strukturellen Ansätzen für das Auffinden der Symbole können diese strukturellen Deskriptoren auch zu einem Merkmalsvektor für eine anschließende statistische Klassifikation umgeformt werden.

Vorteil der strukturellen Deskriptoren ist vor allem eine größere Flexibilität in Vergleich zu den pixelbasierten Ansätzen. Begründet wird dies durch die Invarianz der Deskriptoren gegenüber Position, Skalierung und Drehung, welche bei pixelbasierten Deskriptoren oft nicht trivial und vollständig gegeben ist. Nachteilig sei an dieser Stelle das Verarbeiten vieler oder großer Dokumente genannt. Ergänzend kann sich auch eine umfangreiche Menge an aufzufindender Symbole negativ auf den Rechenaufwand auswirken. Abgesehen von der schlechten Skalierbarkeit ist zudem oft fachspezifisches Wissen beim Arbeiten mit strukturellen Deskriptoren notwendig [TT14]. Strukturelle Deskriptoren verlangen außerdem ein vektorisiertes Eingabeformat der jeweiligen Dokumente. Pixelbasierte Zeichnungen können zwar vektorisiert werden, jedoch ist diese Konvertierung mit zusätzlichen Problemen verbunden. Diese Probleme hängen zunächst von der Auflösung und Qualität der Rastergrafiken ab, im Weiteren aber auch von den jeweiligen Inhalten. Etwa erzeugen

überlappende Primitive möglicherweise nicht korrekte Ergebnisse oder Freiformkurven werden als Menge an aufeinanderfolgenden, kürzeren Linien dargestellt [LR14]. Ein effektives System für die Vektorisierung von architektonischen Zeichnungen wird von Su et al. vorgestellt [SSC05].

Verwandte Arbeiten

Während der Literaturrecherche wurden Arbeiten untersucht, die sich auf verwandte Themengebiete und Teilbereiche des zu entwickelnden Systems beziehen. In Abschnitt 3.1 Symbolerkennung in technischen Zeichnungen werden zunächst verschiedene Methoden und Ansätze beleuchtet, welche das Ziel verfolgen, Symbole in grafischen Dokumenten, insbesondere in technischen Zeichnungen, zu erkennen. Des Weiteren folgt in Abschnitt 3.2 Generierung von 3D-Modellen aus CAD-Grundrissplänen eine Übersicht verschiedener Arbeiten, die sich wie diese Arbeit ebenfalls mit Systemen beschäftigen, relevante Informationen aus Grundrissplänen für die Generierung von 3D-Modellen zu extrahieren. Schwerpunkt dieser Systeme bildet die Erkennung von Symbolen und Mustern, welche anschließend geometrisch und topologisch genauer analysiert werden und daraufhin die strukturelle Zusammensetzung der Gebäudemodelle bilden. Sowohl eine Interpretation als auch eine semantische Beschreibung der Zeichnung ist dafür notwendig. Neben der Funktionsweise der einzelnen Systeme wird dabei insbesondere auf die verschiedenen Einschränkungen und die an Grundrissplänen gestellten notwendigen Bedingungen eingegangen.

Auch wenn sich diese Arbeit mit der Analyse von digital erstellten CAD-Grundrissplänen befasst, so werden in Abschnitt 3.3 Generierung von 3D-Modellen aus Raster-Grundrissplänen dennoch kurz Vorgehensweisen für das Arbeiten mit technischen Zeichnungen im pixelbasierten Format (Rastergrafiken) angeschnitten. Solche Zeichnungen sind unter anderem eingescannte Versionen von zuvor ausgedruckten CAD-Plänen als auch von Hand gezeichnete Pläne. Dabei führt der geringere Informationsumfang bei gleichzeitig verringerter Qualität des Eingabeformates zu zusätzlichen Problematiken.

Xin et al. [YWR09] untersuchten verschiedene Arbeiten, welche sich mit der automatischen Generierung von dreidimensionalen Modellen aus pixelbasierten oder im CAD-Format vorliegenden Grundrissplänen befassen. Unter anderem wird ein Modell vorgestellt, das den grundsätzlichen Aufbau und Umfang eines vollständigen Systems verdeutlicht. Dieses idealisierte Grundgerüst setzt sich dabei aus Ideen und Vorgehensweisen von

unterschiedlichen Systemen zusammen und wird an dieser Stelle für einen elementaren Überblick der Thematik herangezogen. Abbildung 3.1 zeigt den strukturellen Aufbau des Modells, auf welchen im Folgenden näher eingegangen wird.

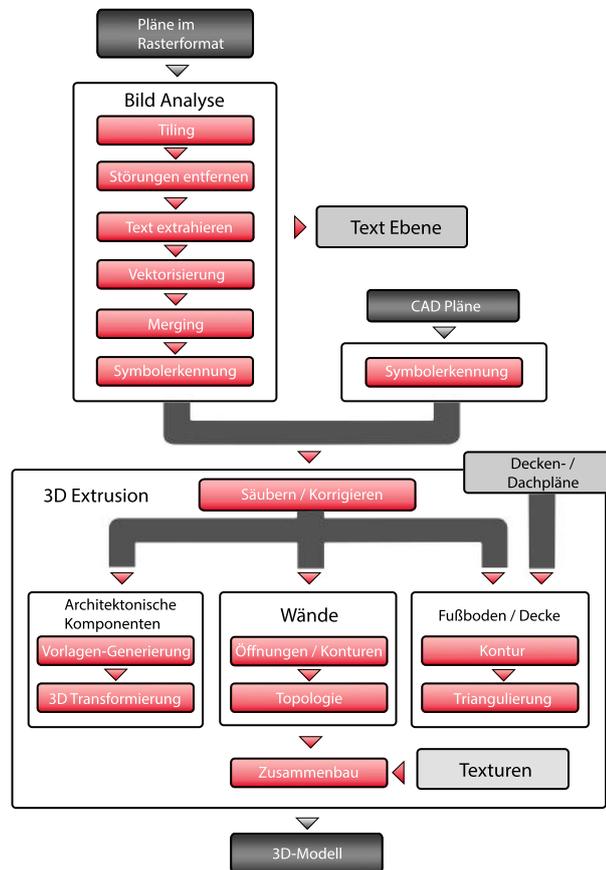


Abbildung 3.1: Idealer Aufbau eines vollständigen Systems für die Generierung von dreidimensionalen Modellen aus Gebäudegrundrissen. In Anlehnung an [YWR09].

Zunächst gilt zu unterscheiden, ob die Eingabedaten im Raster oder CAD-Format vorliegen. Während sich bei CAD-Zeichnungen der grafische Inhalt durch geometrische Primitive zusammensetzt und textuelle Elemente auch als solche einfach auslesbar sind, ist beim Arbeiten im Rasterformat dafür eine Reihe an komplexen Operationen notwendig. Diese Operationen lassen sich prinzipiell unter dem Begriff Vektorisierung vereinen und werden in Xin et al.'s Grundgerüst im Block *image parsing* zusammengefasst. Grundrisse liegen daraufhin in jedem Fall in einem vektorisierten Format vor. Der nächste Schritt beinhaltet das Erfassen des semantischen Inhaltes der Zeichnung durch Methoden der Symbolerkennung. Diese semantischen Informationen sind ausschlaggebend für die Generierung der dreidimensionalen Gebäudebestandteile. Fundamental ist dabei die geometrische Erkennung von Wänden, Türen und Fenstern. In weiterer Folge können

zusätzliche Objekte wie Balkone oder Treppenhäuser detektiert werden. Bevor durch Extrudieren von polygonalen Flächen die Gebäudebestandteile eine dreidimensionale Darstellung annehmen, ist in vielen Fällen eine Korrektur von geometrischen Fehlern notwendig. Solche Fehler sind meist die Folge einer mangelhaften Vektorisierung oder von unsauberen und ungenauen Zeichnen. Bezüglich dem Extrudieren des 3D-Modells adressieren Xin et al. unter anderem folgende Schwierigkeiten: Erzeugen von detaillierten architektonischen Elementen, Verbinden von einzelnen Stockwerken zu einem kompletten Gebäude und das Berücksichtigen von unkonventionellen Designs. Als einer der letzten Schritte erfolgt die Texturierung und Beleuchtung der erfassten geometrischen Objekte.

3.1 Symbolerkennung in technischen Zeichnungen

Systeme, welche in den anschließenden Abschnitt 3.2 Generierung von 3D-Modellen aus CAD-Grundrissplänen fallen, wenden für eine Symbolerkennung meist eigene angepasste Methoden an und sind auf die jeweils vorherrschenden Bedingungen optimiert. Im Folgenden werden anhand von verschiedenen Arbeiten zum Thema Symbolerkennung in technischen Zeichnungen kurz grundlegende Strategien und etablierte Vorgehensweisen näher beleuchtet.

Luqman et al. beschreiben in ihrer Arbeit [LBR09] ein System, welches auf eine strukturelle Repräsentation der Symbole und auf eine statistische Klassifizierung beim Erkennungsprozess zurückgreift. Eingesetzt werden kann das System für die Detektion von beliebigen (unter anderem handgezeichneten) Symbolen im Rasterformat, welche sich aus Linien und Kreisbögen zusammensetzen. Die meisten Symbole in technischen Zeichnungen sind eine Kombination aus solchen Elementen. Nach einer Vektorisierung wird das Symbol als eine Menge von Primitiven (Linien als auch Bögen) durch eine Graphenstruktur repräsentiert. Diese Graphenstruktur beinhaltet die strukturellen Eigenschaften des Symbols und wird anschließend für die Berechnung eines 21-dimensionalen, numerischen Merkmalsvektors herangezogen. Dieser Vektor lässt sich semantisch in drei Bereiche unterteilen: Quantitative Merkmale beinhalten Informationen über die Größe des Symbols und über die Verbindungsdichte der enthaltenen Primitiven. Symbolische Merkmale beschreiben Informationen über die Form des Symbols. Dadurch können Symbole mit gleicher Größe (Anzahl an Primitiven), jedoch unterschiedlicher Form (Anordnung der Primitive) gut unterschieden werden. Als dritten und letzten Bestandteil des Merkmalsvektors geben Bereichsmerkmale Informationen von Attributen (relative Länge und Winkel) der Primitiven wieder. Die Erkennung der Symbole erfolgt durch ein Bayessches Netz, welches zuvor mit Trainingsdaten automatisch aufgebaut und gelernt wurde. Die Trainingsdaten beinhalten eine Menge an unterschiedlichen Symbolen, welche anschließend erkannt werden können. Experimentelle Ergebnisse weisen eine hohe Erkennungsrate von Symbolen bei guter Skalierbarkeit des Systems auf. Die Erkennungsrate sinkt jedoch bei zu starken Deformierungen der Symbole und ist von der Qualität der Vektorisierung abhängig. Im Zusammenhang mit dem Auffinden von Symbolen in technischen Zeichnungen sei auch betont, dass mit diesem Ansatz ausschließlich bereits segmentierte Symbole erkannt wer-

den können. In CAD-Zeichnungen könnten etwa Blöcke mit einer solchen Vorgehensweise auf Symbole untersucht werden.

Auf einen statistischen Ansatz und damit verbunden auf eine Trainingsphase verzichten Yan und Wenyin in ihrem System [YW03]. Stattdessen verfolgen sie strukturelle Ansätze für die Repräsentation von Symbolmerkmalen und deren Erkennung in vektorisierten technischen Zeichnungen. Zentrale Rolle spielt dabei die Entwicklung einer generischen Methode, womit neue Symbole respektive ihre Merkmale zur Laufzeit erfasst und darauffolgend in Zeichnungen gesucht und detektiert werden können. Neue Symbole werden von dem Anwender oder der Anwenderin an das System übergeben, welches die strukturellen Eigenschaften der Symbole daraufhin automatisiert errechnet und durch insgesamt fünf verschiedene Arten von geometrischen Bedingungen beschreibt: Kreuzung von Linien (an ihren Endpunkten, in allen anderen Fällen werden die Linien am jeweiligen Schnittpunkt geteilt), Parallelität von Linien, Rechtwinkligkeit von Linien, Beziehung zwischen Linien und Kreise und als letzte Bedingung die Beziehung zwischen Linien und Kreisbögen. Daraufhin werden die strukturellen Deskriptoren im System durch einen Spannbaum repräsentiert und können für die Erkennung von strukturell identischen Symbolen in vektorisierten Zeichnungen herangezogen werden. Der Spannbaum wird durch eine Graphenstruktur dargestellt, in welcher Knoten die jeweiligen Primitiven des Symbols repräsentieren und Kanten die entsprechenden Beziehungen von Primitiven darstellen. Voraussetzung für die Erkennung ist die Verbindung aller Bestandteile des Symbols durch geometrische Bedingungen und damit die Darstellung durch einen einzigen Spannbaum. Abbildung 3.2 verdeutlicht diese Überführung eines Symbols in einen Spannbaum. Grafik (a) zeigt dabei das eingelesene Symbol, welches sich aus insgesamt sechs Liniensegmenten zusammensetzt. In Grafik (b) werden die geometrischen Bedingungen des Symbols durch die entsprechende Graphenstruktur dargestellt. Knoten bezeichnen die jeweiligen Linienelemente und Kanten drücken Relationen zwischen den Linienelementen aus. Wie in der Grafik zu erkennen, werden zunächst nur einfache Relationen von sich kreuzenden Linien eingetragen. Anschließend erfolgt in Grafik (c) das Hinzufügen der Parallelität von Linien als nächste geometrische Bedingung, wodurch der Graph eine zusammenhängende Komponente bildet und somit kein weiteres Hinzufügen von Relationen notwendig ist. Die letzte Grafik (d) zeigt den aus dem Graphen von Grafik (c) generierten Spannbaum. Dieser Spannbaum wird für das Auffinden der Symbolvorlage herangezogen. Für die Erkennung solcher erfassten Symbolvorlagen wird die jeweilige zu untersuchende Zeichnung ebenfalls durch eine Graphenstruktur repräsentiert und erlaubt somit das Abgleichen von geometrischen Bedingungen und das Auffinden von Teilstrukturen, welche die entsprechenden geometrischen Bedingungen des Symbols beinhalten. Für eine größere Flexibilität können kleinere Abweichungen beim Vergleich der geometrischen Bedingungen vernachlässigt werden, Yan und Wenyin thematisieren dies in ihrer Arbeit jedoch nicht vertiefend. Experimente mit verschiedenen technischen Zeichnungen zeigten gute Resultate, was Effizienz und Erkennungsrate betrifft. Dennoch weisen Yan und Wenyin darauf hin, dass Verbesserungen und Erweiterungen des Systems angebracht seien. Unter anderem würde die Erzeugung einer Symbolstruktur basierend auf mehreren Symbolvorlagen statt lediglich einer einzigen die Erkennungsrate verbessern. Ebenso

würde bei falschen Erkennungen vom Anwender oder der Anwenderin einfließendes Wissen den praktischen Nutzen des Systems erweitern.

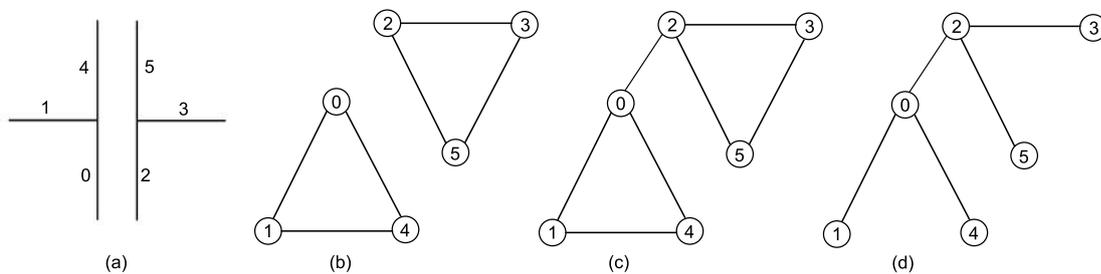


Abbildung 3.2: Generierung des Spannbaums, welcher die strukturellen Merkmale des Symbols beinhaltet. Eigene Darstellung nach [YW03].

Eine zum System von Yan und Wenyin ähnliche, aber umfangreichere Funktionsweise beschreibt die Arbeit von Guo et al. [GZW12]. Auf technische CAD-Zeichnungen ausgelegt findet und erkennt das System Symbole, welche sich aus Linien, Kreisbögen (Kreis wird als Spezialfall eines Kreisbogens aufgefasst) und Textelemente zusammensetzen. Analog zu Yan und Wenyin's Arbeit [YW03] wird die Struktur eines Eingabe-Symbols automatisch analysiert, die relevanten geometrischen Bedingungen in einem Spannbaum gespeichert und darauffolgend in technischen Zeichnungen durch Abgleichen der Graphenstrukturen nach dem Symbol gesucht. Im Unterschied zu Yan und Wenyin's Arbeit wird auch Text als Grundelement definiert und die insgesamt fünf geometrischen Bedingungen werden wie folgt definiert: Kreuzung von Linien (an ihren Endpunkten, in allen anderen Fällen werden die Linien am jeweiligen Schnittpunkt geteilt), Parallelität von Linien, Beziehung zwischen Linien und Kreisbögen, Beziehung zwischen Linien und Text und abschließend die Beziehung zwischen Kreisbögen und Text. Bei der Generierung des Spannbaumes aus einer Menge an geometrischen Bedingungen erfolgt ein Priorisieren dieser Bedingungen. Einfache geometrische Relationen (vor allem Relationen zwischen Linien) werden komplexeren (etwa Relationen, welche Textelemente beinhalten) bevorzugt. Ähnlich dazu wird auch der Startknoten, die Wurzel des Spannbaums durch Priorisieren der Grundelemente festgelegt. In typischen technischen Zeichnungen überwiegt die Anzahl der enthaltenen Linien prinzipiell jene der Kreisbögen und Textelemente. Beinhaltet ein Symbol ein Textelement, so wird dieses Textelement als Startknoten gewählt. Bei der Suche nach dem Symbol werden in einer Zeichnung somit von Beginn an viele Primitive ausgeschlossen und nur an geeigneten Stellen (in diesem Fall wo ein Textelement vorhanden ist) nach dem Symbol gesucht. Eine weitere Verbesserung wird durch Definieren von sich wiederholenden Symbolteilen geschaffen. Bestimmte Symbole beinhalten Bestandteile, welche sich beliebig oft wiederholen können. So können sich beispielsweise Darstellungen von Treppenhäusern nur durch die Anzahl der enthaltenen Stufen unterscheiden. Um nun nicht für jedes dieser strukturell ähnlichen Treppenhäuser eine eigene Repräsentation des Symbols zu erstellen, können aufeinanderfolgende Stufen manuell durch eine sogenannte

virtuelle Relation beschrieben werden. Abbildung 3.3 verdeutlicht das grundlegende Prinzip. Das Treppenhaus in Grafik (a) unterscheidet sich von Treppenhaus in Grafik (b) nur durch die abweichende Anzahl an Treppen. Die sich wiederholende Struktur der einzelnen Treppen kann mit einer virtuellen Relation beschrieben werden, ohne dabei auf die genaue Anzahl der Treppen einzugehen. Grafik (c) stellt die dadurch entstandene, vereinfachte Struktur dar, mit welcher beide Treppenhäuser erkannt werden können. Beim Testen des Systems stellten Guo et al. zufriedenstellende Ergebnisse fest. Experimente zeigten, dass global Transformationen die Performance des Systems nur minimal beeinflussten. Kleinere vektorielle Verzerrungen wie etwa Winkel- oder Längenabweichungen einzelner Primitive beeinflussen das Ergebnis ebenfalls nur minimal. Bei stärkeren Verzerrungen und damit größeren strukturellen Abweichungen sinkt die Erkennungsrate und falsche Positive können nicht ausgeschlossen werden. Eine noch weiter zu untersuchende Problematik stellen Unterbrechungen der Symbole durch angrenzende Primitive dar. In solchen Fällen kann die Anzahl und Anordnung der Primitive im aufzufindenden Symbol variieren, wodurch das entsprechende Symbol unter Verwendung der ursprünglichen geometrischen Bedingungen nicht in allen Fällen erkennbar ist.

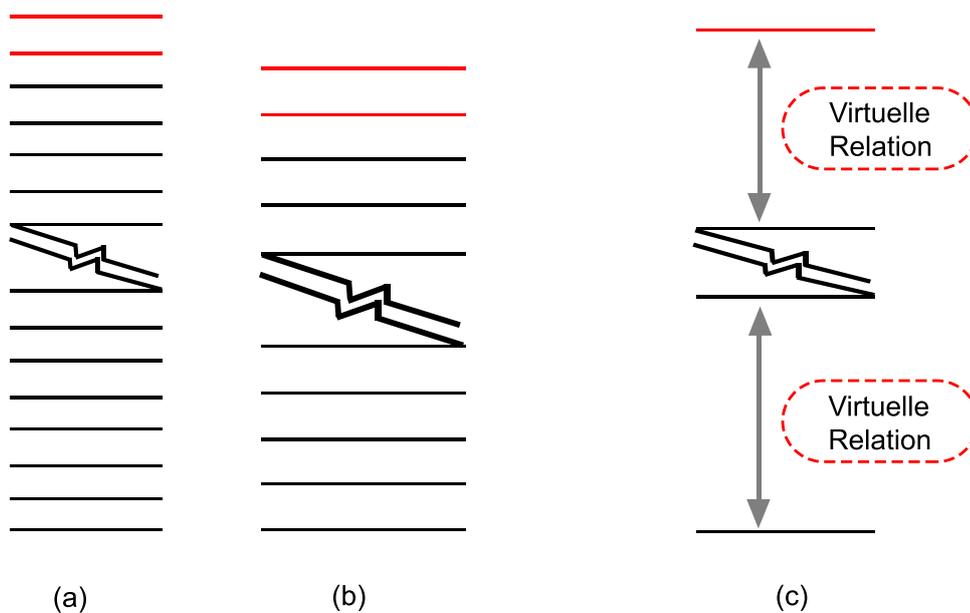


Abbildung 3.3: Grundlegendes Prinzip der virtuellen Relation an Beispiel von zwei ähnlichen Treppenhäusern. In Anlehnung an [GZW12].

Abschließend und zusammenfassend sei erwähnt, dass die große Menge an möglichen Symbolen als auch der variierende Kontext grafischer Dokumente einer effektiven und effizienten Symbolerkennung entgegenwirken. Verschiedene Symbole mit nahezu identischer struktureller Zusammensetzung erschweren oft eine eindeutige und korrekte Erfassung der Symbole. Zudem müssen auf Grund von Überlagerungen der Symbole mit Linien

oder sonstigen grafischen Inhalten strukturelle Abweichungen zur Symbolvorlage berücksichtigt werden. Ebenso können Zeichenfehler oder Verzerrungen in grafischen Inhalten zu Veränderungen von Symbolstrukturen führen. Diese Problematiken führen zum Dilemma, dass für eine korrekte Erkennung die Segmentierung des Symbols vom grafischem Umfeld notwendig ist, jedoch eine fehlerfreie Segmentierung die Erkennung des Symbols voraussetzt. Für Symbole in technischen Zeichnungen, für welche sich ein Erkennungsprozess basierend auf strukturelle Vergleiche mittels Graphenstrukturen anbietet, ist eine schlechte Skalierbarkeit auf Grund des hohen Rechenaufwands zu berücksichtigen. Schlussendlich ist ein Kompromiss zwischen Effizienz, Generizität und Automation aus heutiger Sicht unumgänglich [TT14].

3.2 Generierung von 3D-Modellen aus CAD-Grundrissplänen

Für einen tiefgreifenderen Einblick werden nun einige ausgewählte Arbeiten besprochen, welche sich mit der automatischen Generierung von 3D-Modellen aus Grundrissplänen im CAD-Format beschäftigen als auch Ansätze für die Erfassung der topologischen Zusammensetzung der Gebäudeinhalte vorgestellt. Dabei wird insbesondere auf notwendige Vorbedingungen an Grundrisspläne als auch auf den Funktionsumfang der Systeme eingegangen.

Zhu et al. stellen in ihrer Arbeit [ZZW14] grundsätzlich folgende zwei Bedingungen an CAD-Grundrisspläne: Die Zeichnung muss sich ausschließlich aus einer Menge an geraden Linien, Kreisbögen und Textelemente zusammensetzen. Des Weiteren wird angenommen, dass strukturelle Komponenten wie Wände und funktionale Komponenten wie Türen und Fenster (Wandöffnungen) nicht isoliert vorkommen. Sie müssen eine Verbindung zu anderen Wänden beziehungsweise Wandöffnungen aufweisen. Eine bestimmte Ebenenstruktur der CAD-Zeichnung sowie die Verwendung von Blöcken (für Symbole wie Türen oder Fenster) wird nicht vorausgesetzt. Einer der ersten Schritte im vorgestellten System beinhaltet das Erkennen von Symbolen. Basierend auf den von Guo [GZW12] vorgestellten Algorithmus (siehe vorherigen Abschnitt 3.1 Symbolerkennung in technischen Zeichnungen) können Wandöffnungen und dekorative Elemente (etwa Einrichtungsgegenstände) erkannt werden. Anschließend werden zusätzliche semantische Informationen einiger Tür- und Fenstersymbole extrahiert und für eine detailliertere 3D-Darstellung herangezogen. Als Beispiel sei die Türausrichtung genannt, welche durch die Position des Kreisbogens bei Drehtüren berechnet werden kann. Dies impliziert jedoch, dass nicht für alle möglichen Symbole semantische Informationen auslesbar sind, sondern nur für eine bestimmte Teilmenge. Beispielsweise könnte die Türausrichtung von Türsymbolen mit Liniensegmenten anstelle des Kreisbogens nicht berechnet werden. Des Weiteren würden zweiflügelige Türen oder Pendeltüren gesonderte Berechnungen erfordern. Auf die Erkennung der Wandöffnungen aufbauend werden Wandsegmente in der restlichen Zeichnung gesucht. Angenommen wird dabei, dass Wände durch zwei parallele Linien repräsentiert werden. Für eine bessere Unterscheidung von Wänden und sonstigen

parallelen Linien (Bemaßung oder Mittellinien) wird auf die von Lu et al. [LYYC07] vorgestellte Methode zurückgegriffen. Gesucht wird dabei nach Wandkreuzungen mit einer L, T oder X Form. Erweitert wird dieser Ansatz durch das Hinzunehmen der I Form, welche als geraden Abschnitt ein Wandsegment zwischen zwei Wandöffnungen definiert. An dieser Stelle sei angemerkt, dass runde und isolierte Wände, Wände in beliebigen Formen (etwa variierende Dicke) sowie Säulen (unter anderem zwischen Wänden) nicht erkannt werden können. Erkannte Wandsegmente und Wandöffnungen werden in einem Graph gespeichert und darin als Knoten dargestellt. Kanten definieren die strukturelle Beziehung zwischen den verschiedenen Bestandteilen. Dieser Graph wird darauf hin für die Suche nach Räumen herangezogen. Räume stellen durch Wände und Wandöffnungen begrenzte Flächen dar und können durch Auffinden von bestimmten Schleifen im Graphen erkannt werden. Rauminformationen sind für eine grundlegende dreidimensionale Modellerzeugung nicht zwingend notwendig, können aber die geometrische Konstruktion vereinfachen und beinhalten zudem wichtige topologische Informationen.

In Dominguez et al.'s Arbeit [DGF12] werden Wandstrukturen ebenfalls durch Auffinden von parallelen Linien detektiert und mittels Graphen beschrieben. Die Arbeit beschreibt Methoden für die halbautomatische Erkennung der topologischen Zusammensetzung von CAD-Grundrissplänen. Verglichen mit Zhu et al.'s entwickeltem System können sich Wände auch aus parallel angelegten Kreisbögen zusammensetzen. Zudem werden neben L, T, X und I Kreuzungen von Wänden auch zusätzlich beliebige Arten von Kreuzungen behandelt. Abbildung 3.4 verdeutlicht die zeichnerische Darstellung dieser Wandformen. Säulen werden abhängig von der vorherrschenden Struktur nicht immer als Wandbestandteile erkannt. Unumgänglich ist bei der beschriebenen Vorgehensweise eine bestimmte Struktur der CAD-Zeichnung. Wände müssen dabei in eigene Ebenen gezeichnet werden. Diese Ebenen dürfen dabei keine zusätzlichen Elemente des Grundrissplans beinhalten. Eine Erkennung von Symbolen ist nicht integriert, weshalb Wandöffnungen (Türen und Fenster) als Blöcke definiert werden müssen. Die Bezeichnung der Blöcke muss dabei bestimmten Konventionen befolgen, ansonsten ist ein manueller Eingriff für die Klassifizierung der Blöcke notwendig. Wandöffnungen werden zudem nur für die topologische Verknüpfung der einzelnen Wandsegmente herangezogen, semantische und geometrische Informationen der Türen und Fenster werden nicht berechnet.

Noack beschäftigt sich in seiner Arbeit [Noa01] mit der Konvertierung von CAD-Grundrissplänen in das IFC-Format (siehe Abschnitt 2.3 IFC-Datenmodell). Diese Konvertierung unterteilt er in folgende aufeinander aufbauende Prozesse:

- *Form Identifizierung*: Zunächst müssen aus dem eingelesenen Grundrissplan die einzelnen Bestandteile eines Gebäudeelements ermittelt werden. Gebäudeelemente, welche sich mit anderen Zeichenelementen überschneiden, stellen laut Noack dabei die größte Problematik dar.
- *Form Klassifizierung*: Die zuvor erfassten Bestandteile müssen einem bestimmten Objekt-Typ zugeordnet werden, etwa ob es sich um eine Tür, Fenster oder Wand handelt.

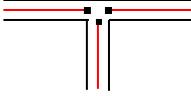
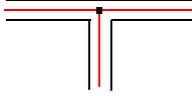
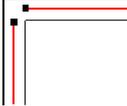
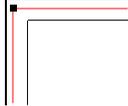
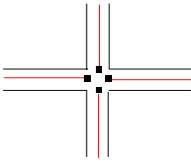
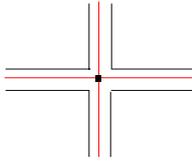
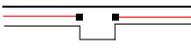
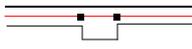
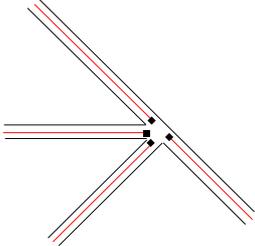
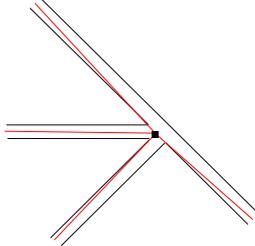
Fall	Layout	Wand Kreuzungspunkt
T - Kreuzung		
L - Kreuzung		
X - Kreuzung		
I - Kreuzung		
Standard (Schwerpunkt)		

Abbildung 3.4: Kreuzungen von Wandsegmenten, welche die Detektion von Wänden unterstützen. Eigene Darstellung nach [DGF12].

- *Form Interpretierung*: Eigenschaften eines klassifizierten Objektes werden anhand der Struktur und Vorwissen über Objekte berechnet. Neben den primären geometrischen Informationen des Objekts (etwa Fläche) kann dies beispielsweise die Ausrichtung von Türen oder die Anzahl der Glasscheiben in einem Fenster beinhalten.
- *Erzeugung von Beziehungen*: Abschließend müssen die Beziehungen der Objekte zueinander untersucht werden. Unter anderem ermöglicht dies die anschließende Beschreibung von Räumen.

Die von Noack präsentierten Ansätze setzen eine bestimmte Ebenenstruktur der Grundrisspläne voraus. Wände müssen in eigenen Ebenen gezeichnet werden, weitere Symbole

sollen ebenfalls in getrennten Ebenen vorkommen, um den Berechnungsaufwand zu verringern und um die Symbole isoliert darzustellen. Die Klassifizierung der Wände erfolgt trivial durch den Namen der entsprechenden Ebenen, bei allen weiteren Objekten wird auf einen statistischen Ansatz zurückgegriffen. Ein achtdimensionaler Merkmalsvektor repräsentiert dabei die Struktur der Objekte und wird schließlich durch ein künstliches neuronales Netz einer bestimmten Objektklasse zugeteilt. Im Zuge der *Form Interpretierung* erfolgen Annahmen an die Objekte und ihrer Struktur, wodurch geometrische und semantische Informationen nur für eine bestimmte Teilmenge an möglichen Fenster- und Türsymbolen berechnet werden können. Auch Wände müssen für die korrekte geometrische Beschreibung gewisse strukturelle Eigenschaften aufweisen. So werden etwa Wände mit variabler Dicke, einer runden Form oder speziellen Verbindungen zu benachbarten Wandsegmenten und Wandöffnungen nicht unterstützt.

3.3 Generierung von 3D-Modellen aus Raster-Grundrissplänen

Für einen vollständigeren Überblick werden nun abschließend Ansätze beschrieben, welche für die Verarbeitung von Grundrissplänen im Rasterformat ausgelegt sind. Wie das zuvor vorgestellte Modell von Xin et al. [YWR09] in Abbildung 3.1 verdeutlicht, ist eine Vorverarbeitung der Grundrisspläne notwendig, um die erforderlichen geometrischen und semantischen Informationen aus den pixelbasierten Zeichnungen zu extrahieren. Nach dieser Vorverarbeitung, welche in vielen Fällen mit einer Vektorisierung gleichzusetzen ist, lassen sich zur Verarbeitung von CAD-Plänen ähnliche Methoden einsetzen.

Die Arbeiten [AST97] [DM99] [DTASM00] von Tombre's Forschungsgruppe beschäftigen sich mit der dreidimensionalen Rekonstruktion von eingescannten gedruckten CAD-Grundrissplänen. Einen der ersten Schritte stellt die Trennung von Text und den restlichen graphischen Informationen dar. Liniensegmente werden in Vektorgrafiken konvertiert, wobei zwischen dünnen und dicken Linien differenziert wird. Wände werden einerseits durch Auffinden von parallelen dicken Linien oder durch einzelne dicke Linien (entspricht Wandsegmenten mit gefüllter Fläche) erkannt. Symbole wie Türen und Fenster werden innerhalb der verbleibenden Menge an dünnen Linien detektiert. Strukturelle Annahmen schränken den Erkennungsprozess auf eine geringe Teilmenge an Symbolen ein, welche erfolgreich erkannt werden können. Flächen, die sich durch geschlossene Schleifen bestehend aus benachbarten Objekten (Wandsegmente sowie Wandöffnungen) aufspannen, werden als Räume interpretiert. Die 3D-Rekonstruktion von einzelnen [AST97] als auch von mehreren aufeinandergestapelten Stockwerken (manuelle Eingriffe sind dabei nicht ausgeschlossen) [DM99] [DTASM00] ist daraufhin möglich.

Moloo et al. beschränken sich in ihrer Arbeit [MDA11] auf die Erkennung von pixelbasierten Grundrissen, welche sich graphisch lediglich aus horizontale sowie vertikale Wandstrukturen und Wandöffnungen zusammensetzen. Textueller Inhalt wird in der Grafik entfernt, gefolgt von einer Konvertierung horizontaler und vertikaler Linien in Vektorgrafiken. Diese Linien werden anschließend gruppiert und horizontale und vertikale

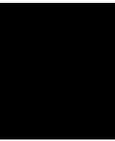
Rechtecke bilden potentielle Wandsegmente. Eine ähnliche Vorgehensweise wird für das Auffinden von Fenstern angewendet, wobei jedoch manche Fenster bereits in Wandflächen integriert und dadurch nicht mehr auffindbar sein könnten. Übriggebliebene Bestandteile der Zeichnung werden segmentiert und durch eine Kombination von Template-Matching und Histogramm-Matching auf Symbole von Türen untersucht. Dem Verknüpfen und Ausrichten der aufgefundenen Komponenten folgt abschließend die Generierung eines einfachen dreidimensionalen Modells.

Verschiedene Methoden für die Vorverarbeitung von Grundrissen im Rasterformat und darauf basierende Analysen des Inhaltes werden von Ahmed et. al präsentiert [ALWD11]. Herangezogen werden diese Methoden für die Suche nach benutzerspezifischen Strukturen in Ansammlungen von Grundrissplänen [AWL⁺14], können darüber hinaus aber etwa auch für die Erzeugung von 3D-Modellen eingesetzt werden. Segmentierte Linien werden in eine der folgenden Kategorien eingeteilt: dicke sowie mitteldicke Linien für das Auffinden von Wänden und dünne Linien für die Suche nach Wandöffnungen. Konturen von verbundenen dicken als auch mitteldicken Linien werden verfolgt und durch ein Polygon approximiert. Jedes Polygon repräsentiert daraufhin eine Wand. Wände, welche sich aus dicken Linien zusammensetzen, werden für die Berechnung der äußeren Kontur des Gebäudes herangezogen. Das Erkennen und Lokalisieren von Türen erfolgt mittels pixelbasierten Deskriptoren und orientiert sich primär auf das Auffinden von Kreisbögen. Ansätze für das Erkennen der Fenster werden nicht beschrieben. Die Suche nach Wandöffnungen schließt falsche Positive nicht aus, weshalb eine topologische Kontrolle folgt und sicherstellt, dass sich ein aufgefundenes Symbol zwischen zwei Wänden befindet. Erkannte Wandöffnungen werden durch Wandsegmente ersetzt und Räume definieren sich somit als mit Wänden eingeschlossene Flächen.

Aktuell existiert weder im wissenschaftlichen noch im kommerziellen Bereich ein umfassendes System für die automatische Analyse von Grundrissplänen und darauf aufbauend für die Generierung von dreidimensionalen Gebäudemodellen. Die geometrische und semantische Erkennung von Grundrissplänen ist unvollständig und weist einen Mangel an notwendigen generischen Ansätzen und Methoden auf. Entwickelte Systeme setzen für einen gänzlich automatischen Ablauf oft stark einschränkende Bedingungen an die eingelesebenen Pläne voraus. Solche Bedingungen beziehen sich unter anderem auf die Ebenenstruktur der CAD-Pläne und auf eine obligatorische Verwendung von Blockelementen für die zu erfassenden Symbole. Zudem finden sich weitere Einschränkungen, welche sich auf die zeichnerische Darstellung des Inhaltes beziehen und Gebäudeelemente betreffend geometrische Restriktionen hervorrufen. Beispielsweise werden in allen untersuchten Arbeiten nur Wände mit einer gleichbleibenden Dicke unterstützt. Begründet wird dieser Mangel einer vollständig automatischen und uneingeschränkten Interpretierung von Grundrissplänen durch ungelöste Problematiken bei der Vektorisierung von Rastergrafiken sowie bei der Erkennung von Symbolen. Dabei sind Inkonsistenzen aufgrund des Mangels eines allgemein gültigen Zeichenstandards bei der Erzeugung von Grundrissplänen Ursache dieser Komplikationen. Eine weitere Schwierigkeit für die automatische Generierung dreidimensionaler Modelle stellen dafür notwendige Informationen dar, welche aus den

3. VERWANDTE ARBEITEN

zweidimensionalen Grundrissplänen nicht auslesbar sind. Insbesondere Höhenangaben der Gebäudebestandteile als auch nicht vertikal verlaufende Strukturen erfordern ein manuelles Eingreifen.



Analyse von Grundrissplänen

Der vorherige Abschnitt 2.2 Grundrisspläne beinhaltet einen allgemeinen Überblick zu Grundrissplänen, welche Stockwerke von Gebäuden auf Basis eines horizontalen Schnittes visualisieren. Auch wenn die Erstellung dieser Zeichnungen heutzutage meist in digitaler Form erfolgt, so ist eine maschinelle Erfassung des semantischen Inhaltes nur eingeschränkt möglich. Grundrisspläne sind für die Interpretation durch menschliche Akteure ausgelegt, wodurch die maschinelle Erfassung des Inhaltes und die darauf aufbauende automatische Generierung von 3D-Modellen keinen trivialen Prozess darstellt. Genauer gesagt beruht diese Problematik der maschinellen Interpretation von Grundrissplänen zunächst auf fehlende semantische Informationen über die einzelnen graphischen Elemente der Zeichnung. So kann etwa nicht ausgelesen werden, ob eine Linie einen Teil einer Wand bildet, zu einem Fenstersymbol gehört oder gar nicht Bestandteil der Gebäudestruktur darstellt. Daneben erschwert der Mangel an obligatorischen Richtlinien und Zeichenstile die automatische Deutung des Zeichninhaltes. Als Beispiel sei die Handlungsfreiheit genannt, Symbole wie Türen und Fenster nach eigenen Präferenzen zu gestalten. Ebenso wird der notwendige und obligatorische als auch ein dazu supplementärer Inhalt eines Grundrissplans nicht eindeutig definiert und variiert je nach Einsatzzweck. Ein weiterer ausschlaggebender Punkt stellt die starke Varietät von möglichen Gebäudeformen dar.

Im Folgenden wird nun näher auf Charakteristiken und strukturelle Eigenschaften dieser Pläne eingegangen. Untersucht wurde dabei eine Menge an unterschiedlichen Plänen mit dem Ziel, strukturelle als auch semantische Gemeinsamkeiten und Übereinstimmungen zu finden. Unterschiedliche Pläne bedeutet in diesem Kontext in erster Linie, dass Grundrisszeichnungen von verschiedenen Personen und Institutionen herangezogen werden. Damit soll eine zu starke Konzentration auf einzelne bestimmte Zeichenstile und Präferenzen vermieden werden. Unter anderem wurden Pläne von Architekturstudenten diverser Universitäten untersucht als auch Zeichnungen von Architekturbüros herangezogen. Zusätzlich wurden im Internet öffentlich zugängliche Pläne begutachtet. Der Großteil der untersuchten Pläne liegt in einem CAD-Format vor, daneben wurden aber auch Pläne

im Rasterformat und im PDF-Dateiformat untersucht. Zudem fließen Darstellungen einzelner Symbole als auch brauchbare Ausschnitte von Grundrissplänen mit ein. Diese notwendige Analyse von Grundrisszeichnungen formt ein Regelwerk und damit das Fundament und die Ausgangsbasis der entwickelten Algorithmen und Vorgehensweisen für die Generierung der 3D-Gebäudemodelle.

Prinzipiell können Grundrisspläne in verschiedenen Detailstufen gezeichnet werden und beinhalten dadurch eine variable Menge an Informationen. Je nach verwendetem Maßstab werden strukturelle Details als auch semantische Zusatzinformationen vernachlässigt (kleiner Maßstab) oder miteinbezogen (großer Maßstab). Dies führt damit zu diversen Abstraktionsgraden des gezeichneten Gebäudes. So wird etwa eine Tür abhängig vom Maßstab oft nur als eine dicke Linie gezeichnet, oder in größeren Zeichnungen durch eine akkurate horizontale Schnittfläche dargestellt. Neben dem verwendeten Maßstab sind Zweck und Funktion der Zeichnung ebenfalls ausschlaggebend für den jeweiligen Inhalt. Abhängig von der Planungsphase des Bauvorhabens variiert der Inhalt als auch die entsprechende zeichnerische Darstellung des Gebäudegrundrisses. In Tabelle 4.1 sind verschiedene mögliche Inhalte eines Grundrissplans aufgelistet. Grundsätzlich lässt sich dieser Inhalt in zwei Kategorien einteilen: Architektonische Elemente und Zusatzbeziehungswise Hilfselemente. Während architektonische Elemente sich auf strukturelle, funktionale als auch dekorative Elemente und Objekte beziehen, umfasst die zweite Kategorie semantische Zusatzinformationen, insbesondere Maßeintragungen und Schnittachsen. Wie vorhin erwähnt, kann die zeichnerische Darstellung dieser einzelnen Elemente von Plan zu Plan in vielen Fällen unterschiedlich ausfallen. Für die Generierung von einfachen dreidimensionalen Gebäudemodellen sind prinzipiell architektonische Elemente relevant. Herangezogen werden dabei insbesondere strukturelle Elemente wie Wände und funktionale Elemente wie Türen und Fenster. Für detailliertere und visuell ansprechendere Modelle kann daneben zusätzlich unter anderem auf Werkstoffe und dekorative Elemente wie Einrichtungsgegenstände zurückgegriffen werden (sofern in der Zeichnung vorhanden). Fokus dieser Arbeit liegt in diesem Zusammenhang primär auf dem Erkennen von Wänden und Wandöffnungen, um ein grundlegendes Modell des Gebäudes erstellen zu können. Dennoch werden Außenflächen wie Balkone als auch horizontale Öffnungen wie Treppenhäuser oder Liftschächte für eine vollständigere Modellerzeugung ergänzend behandelt.

Verglichen mit Grundrissplänen im Rasterformat besteht der Vorteil beim Arbeiten mit CAD-Plänen darin, dass bereits elementare geometrische und semantische Informationen auslesbar sind. Primitive wie Kreisbögen oder gerade Linien, Textelemente, Maßeintragungen als auch Texturen und Schraffuren sind voneinander unterscheidbar. Eine Maßeintragung oder Schraffur setzt sich zwar aus Linien zusammen, hebt sich aber inhaltlich von anderen Linien ab. Des Weiteren können diese Objekte zusätzliche Eigenschaften wie beispielsweise eine zugewiesene Farbe beinhalten und in Ebenen und Blöcke gruppiert werden. Zeichenfehler, wie ungenau gezeichnete Linien, können in CAD-Plänen jedoch nicht ausgeschlossen werden. Häufige Zeichenfehler sind vor allem ungewollte überschneidende Linien oder benachbarte Linien ohne gemeinsamen Endpunkt.

Tabelle 4.1: Kategorisierte Inhalte von Grundrissplänen.

Kategorie	Elemente & Objekte	
Architektonische Elemente	strukturelle Elemente	Wände, Säulen/Pfeiler, Balken, ...
	funktionale Elemente	Fenster, Türen, Treppenhäuser, Liftschächte, ...
	funktionale Elemente außen	Balkone, Außentreppen, Zäune, Vordächer, ...
	Anlagen & Einrichtungen	Möbel, Küchenzeile, sanitäre Einrichtungen, ...
Zusatz- & Hilfselemente	Maßeintragungen, Schnittachsen, Text und Nummern, ...	

Bei der Untersuchung von unterschiedlichen Grundrissplänen zeigte sich, dass visuelle Merkmale wie Farbe, Linienbreite oder Linienart teilweise stark differenziert eingesetzt werden. Ebenso kann für den Zweck der 3D-Rekonstruktion nicht von sinnvoll organisierten Ebenen und Blöcken ausgegangen werden. Eine semantische Unterteilung des Inhaltes auf mehrere Ebenen als auch das Einfügen von Symbolen mittels Block-Objekten würde den Erkennungsprozess der Zeichnung wesentlich vereinfachen. Um das Spektrum an Grundrissplänen, welche für die Generierung von Gebäudemodellen herangezogen werden, vergrößern zu können, sollen im Zuge des Erkennungsprozesses diese Informationen nicht berücksichtigt werden. Ebenen werden daher zusammengefasst, Blöcke aufgelöst und Eigenschaften von Linien verworfen. Ausgangszustand der Grundrisszeichnung definiert sich somit als eine Menge an visuell einheitlichen Linien. Ein Linienelement ist dabei entweder eine begrenzte Gerade oder ein Kreissegment. Beliebige Kurvensegmente stellen in Grundrissplänen Ausnahmen dar und werden deshalb nicht miteinbezogen. Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen einen Grundrissplan vor und nach dem Verwerfen dieser Inhalte und Informationen. Die erste Darstellung (Abbildung 4.1) des Grundrissplans stammt von dem Export der Zeichnung aus der CAD-Applikation, während die zweite Darstellung (Abbildung 4.2) nur enthaltene Liniensegmente (gerade Linien als auch Kreisbögen) ohne zusätzliche Charakteristiken zum Inhalt hat.

In den folgenden Abschnitten 4.1 bis 4.5 wird nun genauer auf Bestandteile von Grundrisszeichnungen eingegangen, welche eine fundamentale Rolle für die Generierung der 3D-Modelle spielen. Für die dreidimensionale Modellgenerierung sind insbesondere Wände und darin enthaltene Wandöffnungen erforderlich. Des Weiteren werden ergänzend Räume, Treppenhäuser und Balkone näher untersucht und diskutiert.

4.1 Wandöffnungen

Mit Wandöffnungen sind in diesem Zusammenhang Symbole von Türen und Fenstern gemeint. Die zeichnerische Darstellung dieser Symbole variiert weitgehend stark. Einer-

4. ANALYSE VON GRUNDRISSPLÄNEN

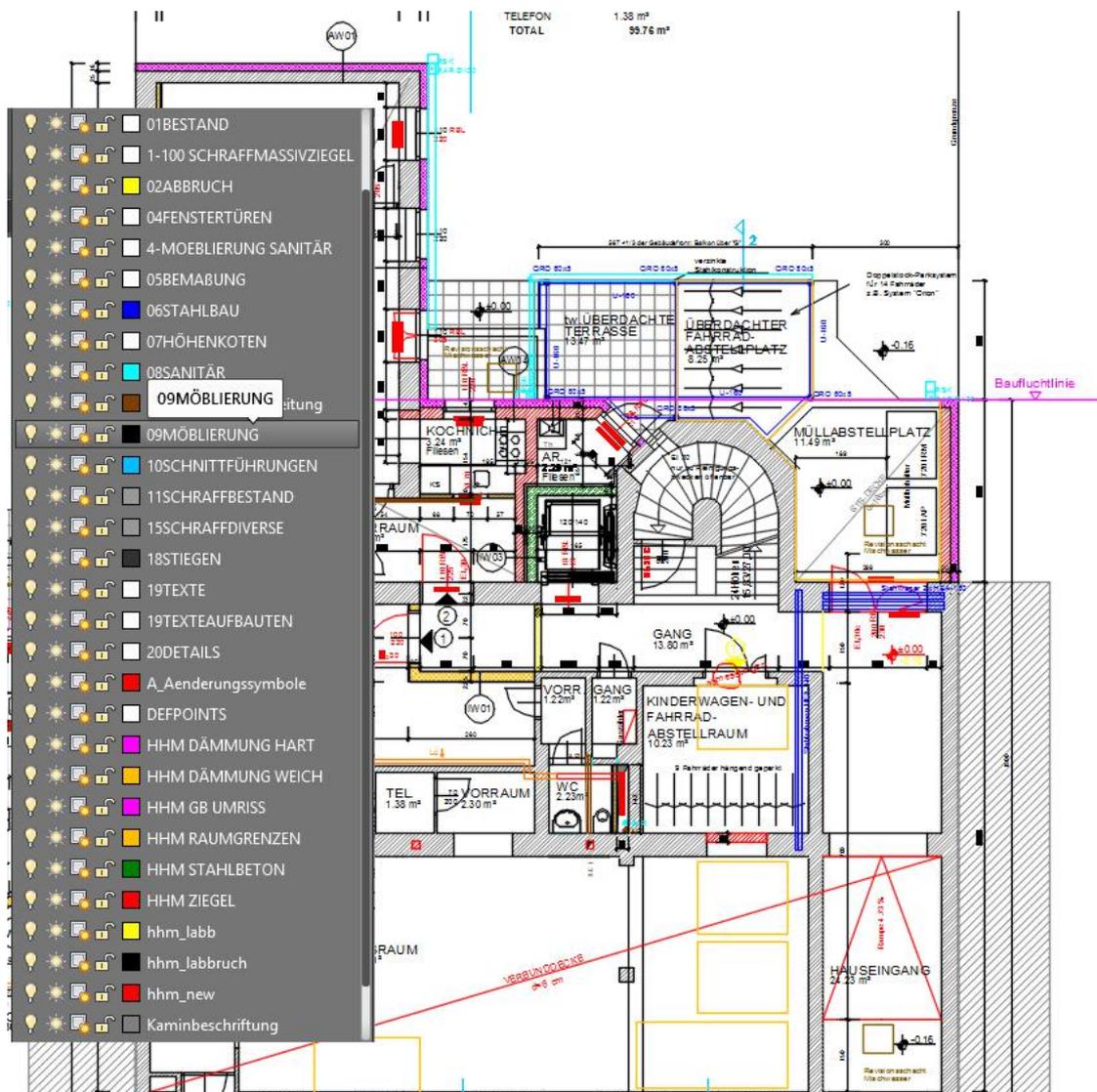


Abbildung 4.1: Ausschnitt eines Grundrissplans mit allen enthaltenen Informationen. Über dem Plan eingefügt wurde links in der Abbildung ein Ausschnitt der enthaltenen Ebenen.

seits setzen verschiedene Arten von Türen und Fenstern unterschiedliche Symbole voraus, andererseits können sich Symbole auch für dieselbe Art einer Tür oder Fenster nochmals deutlich voneinander abgrenzen. Abbildung 4.3 zeigt eine Teilmenge an möglichen Türsymbolen und Abbildung 4.4 eine Teilmenge an möglichen Fenstersymbolen. Diese Abbildungen zeigen auf, dass Türen respektive Fenster in ihrer strukturellen Zusammensetzung manchmal sehr ähnlich sind, in anderen Fällen jedoch deutliche Unterscheidungen aufweisen. Wie unter anderem in Kapitel 3 Verwandte Arbeiten beschrieben, wurde in der

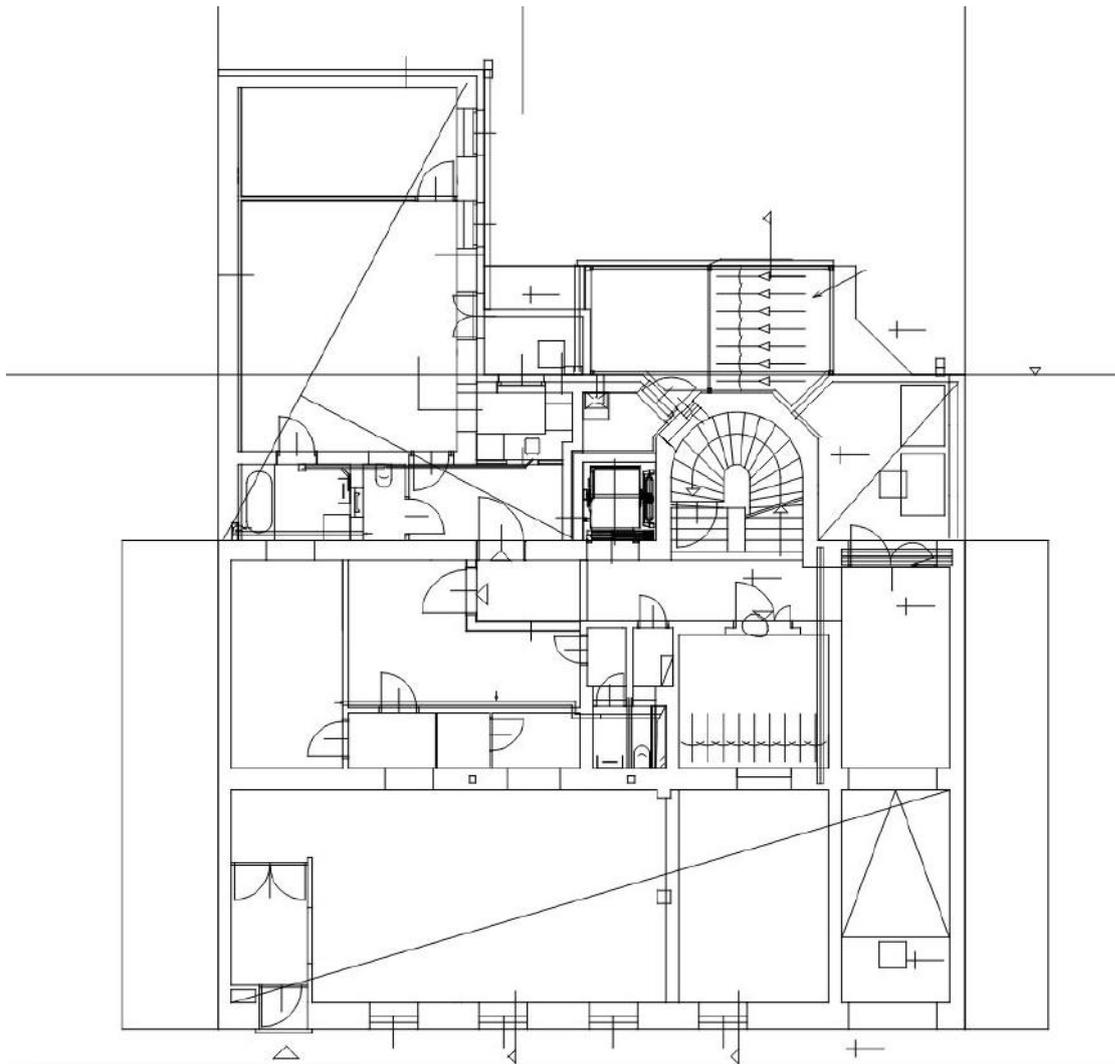


Abbildung 4.2: Ausschnitt des Grundrissplans der vorherigen Abbildung 4.1, wobei nur Linien- und Kreissegmente ohne zusätzliche Informationen und Eigenschaften visualisiert wurden.

Literatur für das Auffinden von Türsymbolen in manchen Arbeiten [ALWD11] [MDA11] auf Kreisbögen zurückgegriffen. Auch wenn Türsymbole häufig einen oder mehrere solche Kreisbögen beinhalten, so können diese nicht uneingeschränkt für das Auffinden der Türsymbole herangezogen werden. Manche Türsymbole besitzen etwa anstelle von Kreisbögen gerade Liniensegmente (zum Beispiel Türsymbol *A* in Abbildung 4.3) und vor allem Schiebetüren enthalten keine dieser Kreisbögen. Fenster werden oft auf Grund ihrer rechteckigen Form erkannt, doch auch hierbei sind verschiedene Abweichungen vorhanden (zum Beispiel Fenstersymbol *A* in Abbildung 4.4).

Als Schlussfolgerung und als brauchbares Ergebnis für die automatische Interpretierung der Grundrisspläne kann insbesondere die direkte Angrenzung von Wandöffnungen an die benachbarten Wände angeführt werden. Dies stellt eine häufige Gemeinsamkeit der verschiedenen Fenster- und Türsymbole in den untersuchten Plänen dar. Alle aufgefundenen Fenstersymbole haben eine direkte Verbindung zu Wänden, während dies bei den meisten untersuchten Türsymbolen der Fall ist. Eine fehlende Verbindung zu den benachbarten Wandsegmenten weist etwa Türsymbol *B* in Abbildung 4.3 auf. Zusätzlich zur direkten Angrenzung von benachbarten Wänden konnte bei den meisten der untersuchten Symbolen festgestellt werden, dass diese Angrenzung auf beiden Seiten des Symbols strukturell identisch ist. In Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4 wird dies mittels farblich gekennzeichneten Linien hervorgehoben. Als Beispiel eines Sonderfalls wird Türsymbol *D* in Abbildung 4.3 angeführt. Der strukturelle Unterschied resultiert dabei aus der abweichenden Länge der Wandangrenzungen.

Ein weiteres oft auftretendes Merkmal in der Analyse ist die zusammenhängende Struktur der Symbole in Form von zusammenhängenden Linien ohne Unterbrechungen. Auch dies ist wiederum bei allen untersuchten Fenstersymbolen zutreffend, bei Türsymbolen sind wiederum Spezialfälle vorhanden. Insbesondere ist die Struktur von Schiebetüren in zwei unverbundene Komponenten aufgeteilt, wie unter anderem Symbol *C* in Abbildung 4.3 verdeutlicht. Ein Großteil der untersuchten Wandöffnungen ist in gerade Wandsegmente eingebunden, Ausnahmen bilden unter anderem Eckfenster (Symbol *B* in Abbildung 4.4) und abgerundete Fenster (Symbol *C* in Abbildung 4.4).

Beim Auffinden von Wandöffnungen kann Vorwissen über die entsprechenden Maße der Fenster und Türen hilfreich sein. Insbesondere lassen sich dadurch etwaige falsche Positive erkennen, welche gerade bei einfach strukturierten Symbolen nicht auszuschließen sind. Unter anderem können dekorative Elemente wie Tische oder Schränke dieselbe Struktur wie ein Fenster besitzen und sich nur durch den topologischen Kontext davon unterscheiden. Miteinbeziehen von Breite und Länge der Symbole als auch die Relation dieser Maße kann für die notwendige Unterscheidung hilfreich sein. Um jedoch keine falsche Negative zu erzeugen, sollten die Maße betreffenden Restriktionen jedoch nicht zu eng gefasst werden.

4.2 Wände

Wände bilden die wichtigsten strukturellen Elemente eines Gebäudes. Im Zuge dieser Arbeit wird nicht zwischen verschiedenen Wandarten unterschieden, ebenso werden Wand-Säulen Kombinationen als reine Wand aufgefasst. Prinzipiell lassen sich Wände, beziehungsweise Wandsegmente in einem Grundrissplan als geschlossene Flächen definieren. Wände bestehen dabei aus aufeinanderfolgenden geraden Linien, können aber auch Kreisbögen beinhalten. In seltenen Fällen könnte eine Wand auch beliebige Kurvensegmente aufweisen. Abbildung 4.5 zeigt einige Beispiele an möglichen Darstellungen und Formen von Wänden in Grundrissplänen. Ein Großteil der Wände besitzt eine gleichbleibende Breite und wird dadurch als zwei parallele Linien zeichnerisch dargestellt. In der Literatur

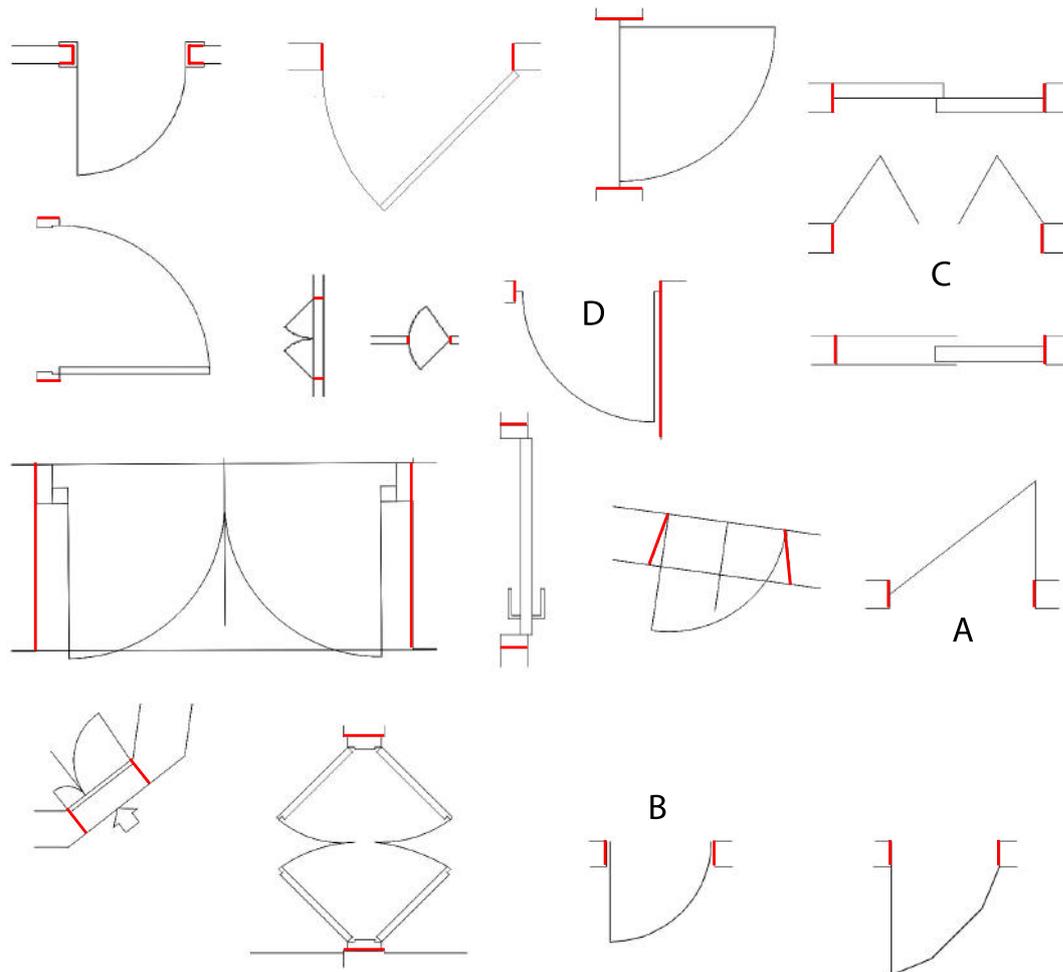


Abbildung 4.3: Teilmenge an möglichen Türsymbolen in Grundrissplänen. Die Angrenzung zu den benachbarten Wänden ist farblich hervorgehoben.

bedienen sich viele Arbeiten der Vorbedingung, dass Wände durch zwei benachbarte parallele Linien gezeichnet werden (siehe Abschnitt 3.2 Generierung von 3D-Modellen aus CAD-Grundrissplänen). Mittellinien in Wandsegmenten als auch sonstige parallele Linien in und neben Wandsegmenten können bei dieser Vorgehensweise jedoch Schwierigkeiten und falsche Positive hervorrufen. Wandinterne Details, variierende Breite, beliebige polygonale Wandflächen, dekorative Details von Wänden oder runde Wandbereiche stellen in diesem Zusammenhang weitere Schwierigkeiten dar. Solche genannten Komplikationen werden in Abbildung 4.6 verdeutlicht.

Die einzige allgemein gültige Charakteristik von Wänden, welche im Zuge der Analyse von Grundrissplänen aufgefunden wurde, ist die bereits angesprochene Begrenzung der

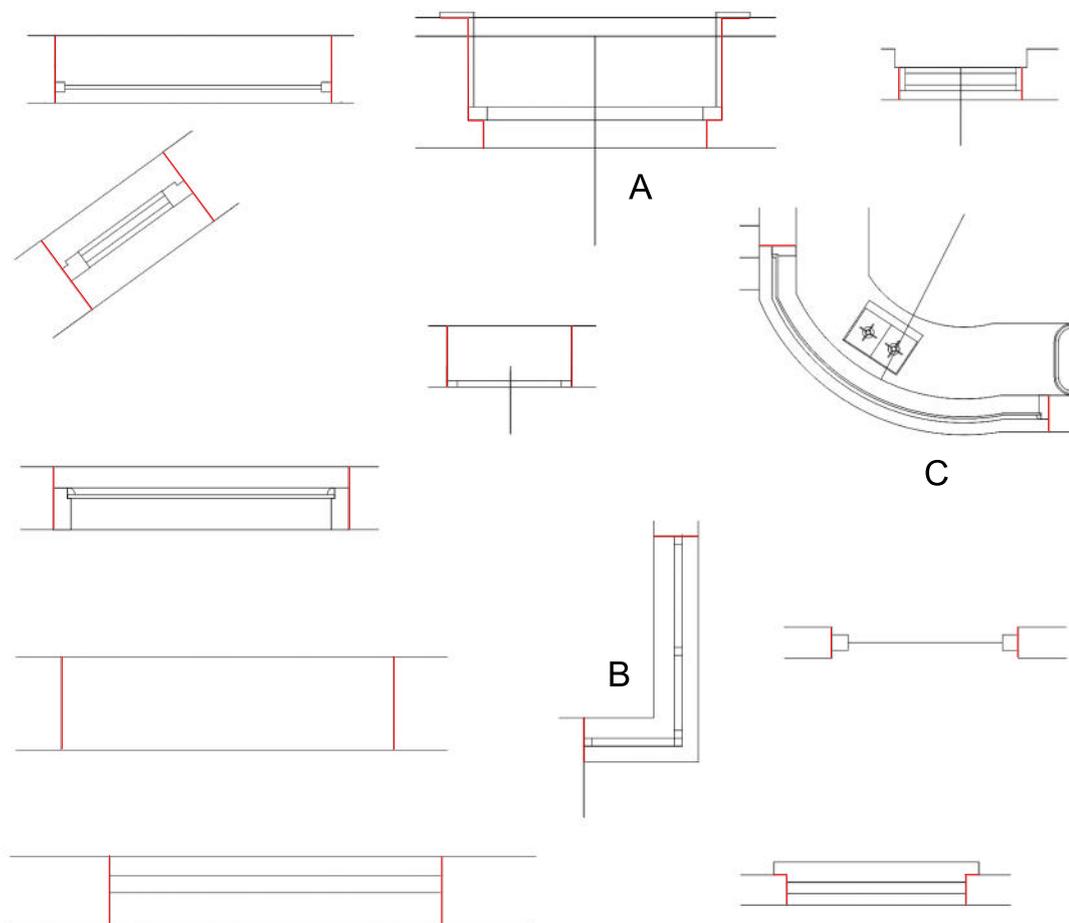


Abbildung 4.4: Teilmenge an möglichen Fenstersymbolen in Grundrissplänen. Die Angrenzung zu den benachbarten Wänden ist farblich hervorgehoben.

Wandflächen durch gerade Linien und Kreisbögen. Vor allem bei informationsreichen Grundrissplänen ist das Detektieren von Wänden ein komplexer Prozess und die Unterscheidung zwischen Wandsegmenten und sonstigen strukturell ähnlichen Elementen wie Hilfslinien oder Einrichtungsgegenstände oft nicht eindeutig. Hilfreich für das Detektieren von Wandflächen ist die Kenntnis darüber, dass Türen und Fenster in Grundrissen zwischen Wänden gezeichnet werden. Dies stellt die Grundlage für die These dar, dass ein Großteil der Wände ausgehend von detektierten Wandöffnungen aufgesucht werden kann. Ausnahmen stellen alleinstehende Wandsegmente und Säulen dar, da diese keine räumliche Verbindung zu Wandöffnungen beinhalten. Untersuchungen von verschiedenen Grundrisszeichnungen haben gezeigt, dass abgesehen von solchen alleinstehenden

strukturellen Elementen prinzipiell alle Wandsegmente durch eine von Wandöffnungen ausgehende Suche aufgefunden werden können. Wandinterne Details, Wandabtrennungen als auch eine indirekte Verknüpfung von Wandöffnungen und Wänden stellen jedoch zusätzliche Schwierigkeiten bei der vollständigen Erkennung der Wandflächen dar und müssen daher auf andere Weise aufgefunden werden.

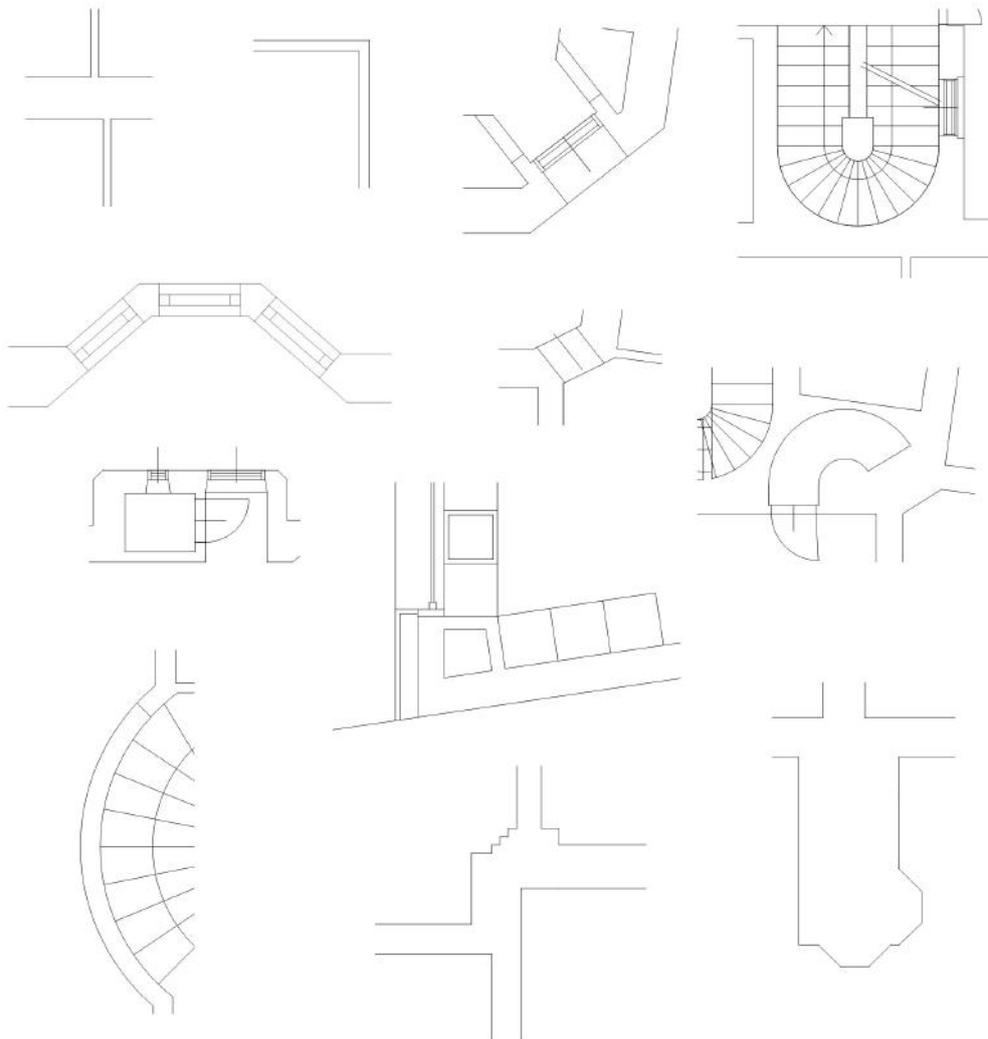


Abbildung 4.5: Ausschnitte von möglichen Wandformen in Grundrissplänen.

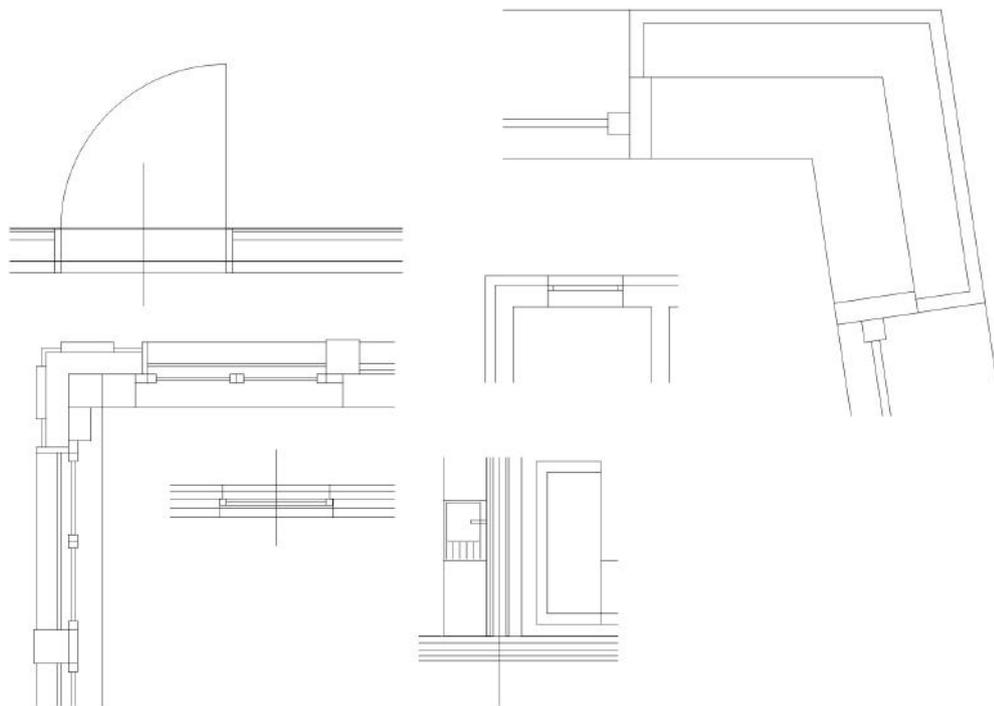


Abbildung 4.6: Übersicht möglicher wandinterner Details. Unterschieden wird dabei zwischen zeichnerischen Darstellungen von Wandschichten sowie zusätzliche Informationen in Form von Mittellinien.

4.3 Räume

Räume definieren sich im einfachsten Fall als von Wänden und Wandöffnungen begrenzte Flächen. Eine solche begrenzte Fläche muss dabei zumindest eine vertikale Öffnung in Form einer Tür oder eine horizontale Öffnung wie etwa ein Treppenhaus beinhalten, um als Raum klassifiziert zu werden. Die Erkennung von Räumen beziehungsweise deren Auffinden in Grundrissplänen ist nicht direkt ausschlaggebend für die Generierung der 3D-Gebäudemodelle. Jedoch können Rauminformationen im Zusammenhang mit der Erkennung von Grundrissen für die strukturelle und topologische Überprüfung herangezogen werden und erlauben eine Unterteilung der Zeichnung in semantisch sinnvolle Teilbereiche. So kann der grafische Inhalt der einzelnen Raumflächen sequentiell für weitere Untersuchungen herangezogen werden (Auffinden von Treppenhäuser oder Einrichtungsgegenstände). Daneben können diese Flächeninformationen der Räume die einfache Erzeugung von Wandobjekten bei der Generierungen der 3D-Modelle unterstützen.

In einigen Grundrissplänen werden Räume mit einer textuellen Beschriftung versehen und liefern einen Anhaltspunkt über die Funktion des Raumes. Ähnlich dazu können dekorative Elemente wie sanitäre Anlagen oder Einrichtungsgegenstände diese Klassifizierung

unterstützen. Solche dekorative Elemente sind wie Raumbeschriftungen nicht in allen Plänen vorhanden und können in unterschiedliche Ausführungen auftreten. Dekorative Symbole können daneben sehr detailreich, aber auch sehr abstrakt mit wenigen Linien gezeichnet werden. Eine eindeutige automatische Erfassung der Raumfunktionen ist daher nicht möglich.

4.4 Treppenhäuser

Treppenhäuser stellen die häufigste horizontale Öffnung in Gebäuden dar und verbinden benachbarte Geschosse vertikal miteinander. Abgesehen von ihrer zeichnerischen Darstellung in Grundrissplänen unterscheiden sich Treppenhäuser auch in ihrer Bauform. Abbildung 4.7 verdeutlicht diese zeichnerischen und strukturellen Abweichungen. Gemeinsam haben alle untersuchten Treppenhäuser die visuelle Wiedergabe von Treppen sowie in vielen Fällen einen angegebenen Richtungspfeil. Dennoch können diese Merkmale auf Grund ihrer zeichnerischen Abweichungen nicht uneingeschränkt für die automatische Detektion herangezogen werden. Treppenhäuser nehmen einen bestimmten Teil bis hin zur gesamten Fläche eines Raumes ein. Die Erkennung der Treppenhäuser nach Auffinden der Raumflächen kann daher den Suchraum begrenzen und die Komplexität des Erkennungsprozesses stark verringern.

4.5 Balkone

Balkone liegen über dem Gebäudeniveau und knüpfen an die Gebäudeaußenseite an. Sie lassen sich ähnlich wie Räume als eine begrenzte Fläche definieren. Ein Balkon ist durch mindestens eine Tür mit einem Raum verknüpft und ist im Unterschied zu Räumen nicht komplett von Wänden umschlossen. Ein Balkon bildet daher einen offenen Austritt und wird neben der Außenwand des Gebäudes durch Brüstungen oder Geländer eingefasst. Solche Begrenzungen werden in vielen der untersuchten Grundrisspläne als eine einfache Linie dargestellt. Je nach Aufbau der Brüstungen und Geländer als auch abhängig von der Höhe des horizontalen Schnittes des Grundrisses kann sich diese Begrenzung jedoch auch aus zwei parallelen Linien zusammensetzen, womit eine eindeutige Abgrenzung von Wänden nicht möglich ist. Eine Problematik stellt daher die korrekte Unterscheidung zwischen Balkon und Raum dar und damit verbunden die korrekte Erkennung der Gebäudekontur. Zusätzlich ist eine Unterscheidung zwischen Balkonen und anderen Außenflächen wie Gärten und Terrassen in manchen Fällen nicht eindeutig möglich. Unter anderem sind dafür Informationen notwendig wie textuelle Bezeichnungen der Flächen, dekorative Elemente (Bäume in Gärten) oder Lage des im Grundriss dargestellten Stockwerkes (Erdgeschoss oder Obergeschoss). Auch werden in manchen Fällen die Durchgänge zu den Balkonen mit unveränderten Fenstersymbolen dargestellt, weshalb sich eine Suche nicht nur auf durch Türen zugängliche Flächen konzentrieren sollte.

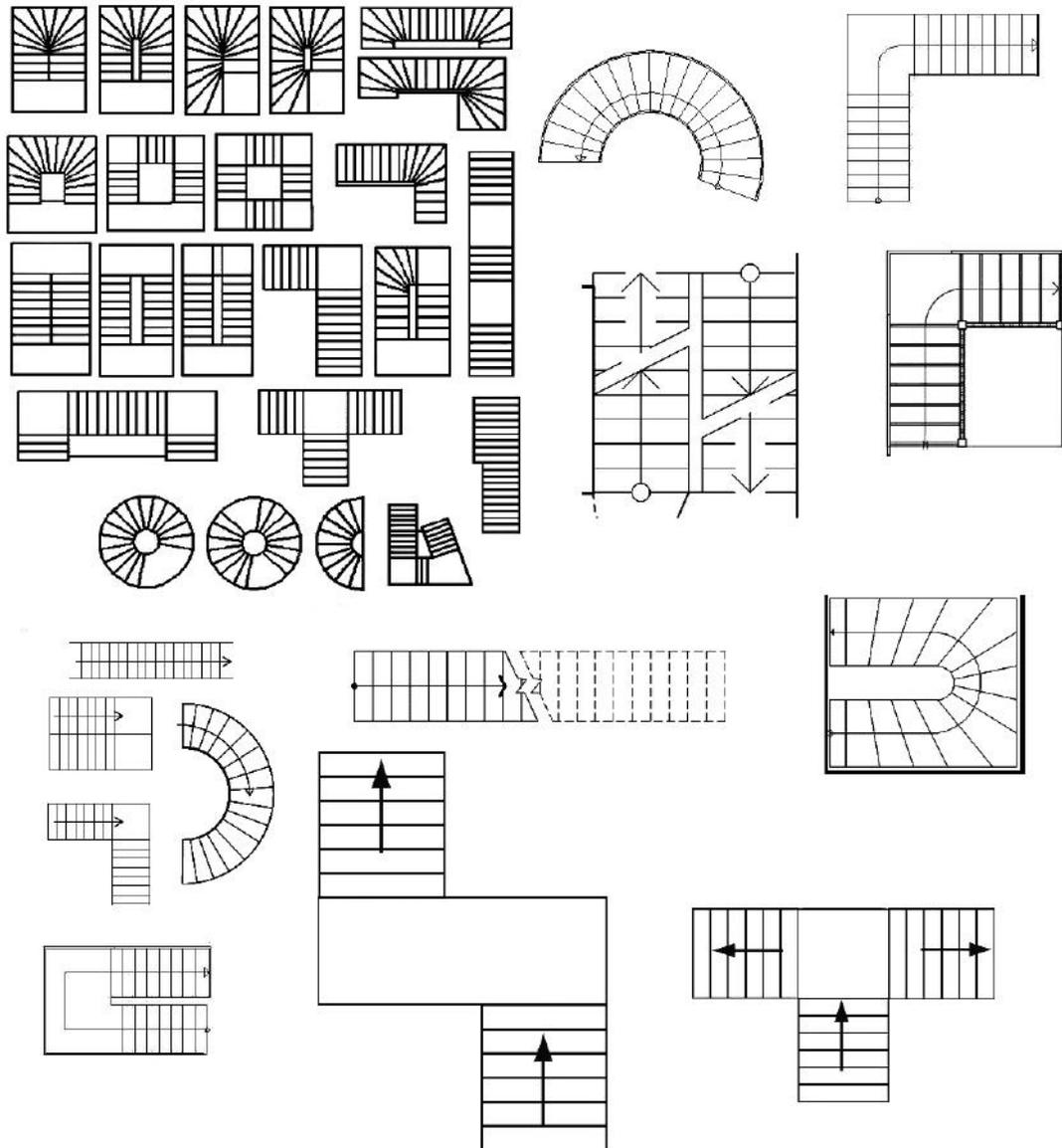


Abbildung 4.7: Unterschiedliche Darstellungen von Treppenhäusern. Abgesehen von einer starken Variation der Bauformen von Treppenhäusern kann sich auch die zeichnerische Darstellung deutlich unterscheiden.



Implementierung

Dieses Kapitel beschäftigt sich im Detail mit dem Aufbau und der Funktionsweise der entwickelten Applikation *CAD2IFC*. Die Problematik, dreidimensionale Gebäudemodelle aus eingelesenen CAD-Grundrisszeichnungen zu generieren, wird in mehrere Komponenten unterteilt (siehe Abbildung 5.1). Dies ermöglicht die Komplexität des Problems zu verringern und strukturiert zu veranschaulichen. Es wird darauf eingegangen, wie die jeweiligen Module zusammenarbeiten und welche Funktion sie hinsichtlich der Generierung der Gebäudemodelle innehaben. Systemaufbau sowie entwickelte Algorithmen orientieren sich an die zuvor in Kapitel 4 Analyse von Grundrissplänen untersuchten Grundrisspläne und darin aufgefundene Charakteristiken.

Abschnitt 5.1 Konzept enthält zunächst Hinweise über verwendete Tools und die Programmierumgebung. Des Weiteren wird kurz das entwickelte Konzept erläutert, um vektorbasierte Grundrisspläne automatisch in das IFC-Datenmodell zu überführen. Angelehnt an Abbildung 5.1 kann dieser Prozess wie folgt zusammengefasst werden: Die eingelesene Zeichnung eines Gebäudegrundrisses wird zunächst in eine geeignete Graphenstruktur überführt (Abschnitt 5.2 Graph Erzeugung). Tür- und Fenstersymbole werden darin mittels struktureller Vergleiche aufgefunden (Abschnitt 5.3 Erkennen von Wandöffnungen) und dienen als Ausgangsbasis für das Erkennen von Wänden (Abschnitt 5.4 Erkennen von Wänden). Nach der Wandsuche werden Raumflächen sowie Gebäudekonturen erstellt und Balkone als auch horizontale Wandöffnungen wie Treppenhäuser daraufhin definiert (Abschnitt 5.5 Erkennen von Räumen und Außenflächen). Diese erfassten strukturellen und semantischen Informationen werden anschließend als dreidimensionales Gebäudemodell im IFC-Format exportiert (Abschnitt 5.6 IFC-Export) und können in konsekutiven Anwendungen eingesetzt und weiterverarbeitet werden.

Die grafische Oberfläche der Applikation wird in Abschnitt 5.7 Grafische Benutzeroberfläche veranschaulicht und Interaktionsmöglichkeiten in diesem Zusammenhang näher hervorgehoben. Zusammenfassend wird durch das in Abschnitt 5.8 Ablaufdiagramm dargestellte Flussdiagramm der automatisierte als auch interaktive Ablauf der 3D-Modellgenerierung

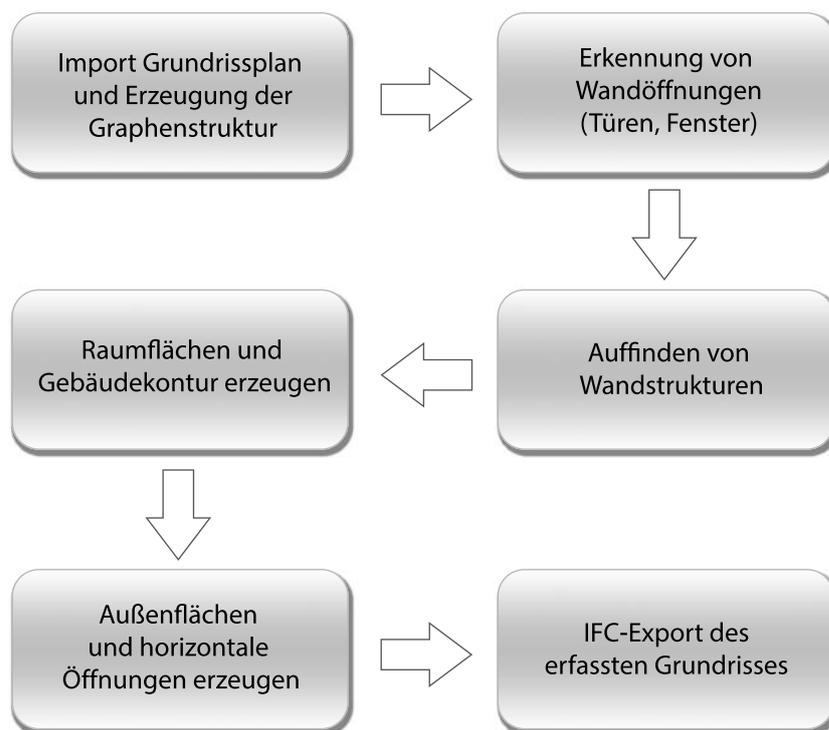


Abbildung 5.1: Grundlegende Systemkomponenten bei der Generierung von 3D-Gebäudemodellen aus Grundrisszeichnungen.

beschrieben. Abschnitt 5.9 Anforderungen an Grundrisspläne beschäftigt sich abschließend mit resultierenden Anforderungen an Pläne für eine korrekte und vollständige Erkennung relevanter Inhalte.

5.1 Konzept

Nachstehend wird neben dem entworfenen Konzept kurz auf die eingesetzte Programmiersprache sowie auf verwendete Softwares und Tools eingegangen. Als Betriebssystem wurde Windows 8.1 in der 64-Bit Version eingesetzt.

Realisiert wurde die Applikation unter der Programmiersprache C++. Für die Programmierung der grafischen Benutzeroberfläche als auch für das Lesen und Schreiben von XML-Dateien und Einstellungsdateien wurde auf die C++-Klassenbibliothek Qt¹ (Version 5.5.1) zurückgegriffen. Die Entwicklung von C++-Applikationen wird mit diesen bereitgestellten umfangreichen Funktionen beschleunigt und verbessert. Zudem unterstützt Qt die Erstellung plattformunabhängiger Anwendungen. Als integrierte Entwicklungsumge-

¹www.qt.io zuletzt Zugegriffen am 27.06.2016

bung wurde Qt Creator² (Version 3.5.1) verwendet. Neben einem Quellcode-Editor und Debugger beinhaltet diese Entwicklungsumgebung einen eigenen GUI-Designer für die Erzeugung grafischer Oberflächen.

Das Lesen und Parsen der CAD-Dateien erfolgt mit der quelloffenen C++-Bibliothek *libdxfrw*³. CAD-Dateien in folgenden Formaten sind damit lesbar: DXF in ASCII Form, DXF in binärer Form sowie DWG beginnend bei Version R14 bis hin zur aktuellen Version 2013. Wie zuvor in Abschnitt 2.2 Grundrisspläne beschrieben wird ein Großteil der vektorbasierten Grundrisspläne in DXF oder DWG gespeichert, oder kann zu einem dieser Formate konvertiert werden.

Für das Generieren der IFC-Datenmodelle wird die kommerzielle Programmbibliothek *IFC engine DLL*⁴ herangezogen. Eine quelloffene und für den Einsatzzweck geeignete Variante war dem Autor zur Zeit der Entwicklung nicht bekannt. Die IFC engine DLL erlaubt das Schreiben von IFC-Dateien in allen aktuellen Versionen. Neben dem gebräuchlichen IFC-SPF Format wird auch das XML basierte Format IFC-XML unterstützt.

Das Konzept für die umgesetzte Applikation wird abschließend in Abbildung 5.2 verdeutlicht. Grundsätzlich kann die Überführung von vektorbasierten Grundrissplänen in das IFC-Datenmodell in drei Hauptmodule gegliedert werden. Das erste Modul importiert geeignete CAD-Dateien und extrahiert relevante Zeicheninhalte (CAD-Import). Diese ausgelesenen Inhalte werden daraufhin im zweiten Hauptmodul (Graph-Operationen) durch einen Graphen repräsentiert, womit eine geeignete Struktur für das Auffinden von Gebäudebestandteilen gegeben ist. Nach dem Erkennungsprozess wird der analysierte Grundrissplan im dritten Hauptmodul (IFC-Export) für die Ausgabe vorbereitet. Die Module am rechten Rand der Abbildung dienen dem Lesen und Schreiben von externen Dateien. Neben dem Einlesen von CAD-Dateien und dem Erstellen von IFC-Dateien umfasst dies das Verarbeiten von XML-Dateien, mit welchen Symbolvorlagen für den Erkennungsprozess definiert werden. Die restlichen Module am linken Rand der Abbildung repräsentieren die grafische Benutzeroberfläche und damit verbundene Operationen, wie etwa das Laden von Benutzerpräferenzen und Parametern (Einstellungen) oder das Verarbeiten und Überprüfen von Benutzerinteraktionen (Controller).

5.2 Graph Erzeugung

Die Überführung des zeichnerischen Inhaltes von CAD-Plänen in eine Graphenstruktur stellt den ersten wichtigen Schritt nach dem Einlesen und Parsen der entsprechenden Grundrisszeichnungen dar. Bevor im Anschluss die verwendete Graphenstruktur und wichtige Aspekte näher betrachtet werden, soll kurz auf notwendige Schritte beim Parsen der CAD-Datei eingegangen werden. Als ersten Schritt werden alle in der CAD-Datei vorhandenen Ebenen ausgelesen und wichtige Informationen wie Name der Ebene und

²www.qt.io/ide zuletzt Zugriffen am 27.06.2016

³www.sourceforge.net/projects/libdxfrw zuletzt Zugriffen am 27.06.2016

⁴www.rdf.bg/ifc-engine-dll.php zuletzt Zugriffen am 27.06.2016

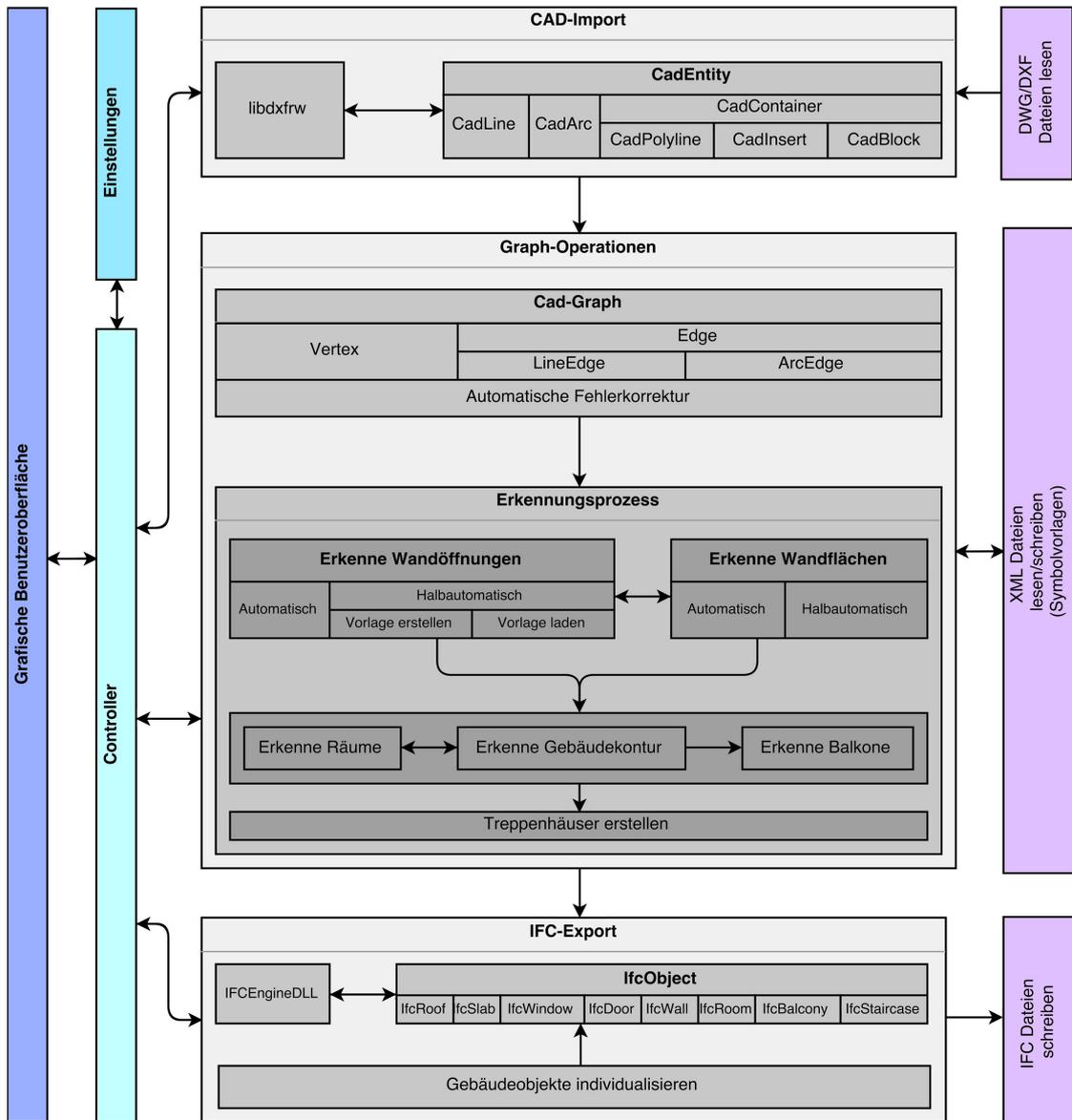


Abbildung 5.2: Modulübersicht des Implementierten Systems.

ihre Sichtbarkeit in eine geeignete Datenstruktur gespeichert. Anschließend folgt das Auslesen von Blöcken. Ein Block definiert sich durch einen eindeutigen Namen und beinhaltet eine bestimmte Menge an Zeichenelementen. Zeichenelemente, im Folgenden Entitäten genannt, welche in Zusammenhang mit dieser Arbeit relevant sind und daher ausgelesen werden, sind nachstehend aufgelistet:

- *LINE*: Gerade Linie, welche durch zwei Punkte im zweidimensionalen Raum definiert wird.
- *ARC*: Kreisbogen, welcher durch Mittelpunkt, Radius sowie Start- und Endwinkel definiert wird.
- *LWPOLYLINE*: Zweidimensionaler Linienzug, welcher sich aus beliebig vielen Teilstrecken zusammensetzt. Eine Liste an zweidimensionalen Koordinaten (Punkte) definiert einen solchen Linienzug. Unterschieden wird zwischen offenen und geschlossenen Polygonzügen.
- *POLYLINE*: Im Unterschied zu *LWPOLYLINE* kann dieser Polygonzug auch im dreidimensionalen Raum erzeugt werden. Ausgelesen werden in Zusammenhang mit dieser Arbeit jedoch nur zweidimensionale Koordinaten.
- *INSERT*: Referenz eines Blockes. Beinhaltet den Namen des jeweiligen Blockes als auch einen bestimmten Punkt, welcher den Ursprung des einzufügenden Blockinhaltes definiert. Daneben erlaubt *INSERT* eine Skalierung und Drehung der enthaltenen Entitäten. Durch Angabe von Zeilen- und Spalteninformationen kann der Blockinhalt mehrfach in tabellarischer Form eingefügt werden.

Nach Erfassen der Blöcke und den darin vorkommenden Inhalten werden aus der Zeichnung jene Entitäten ausgelesen, welche den effektiven Zeicheninhalt bilden. Unterstützt werden dabei wiederum die vorhin aufgelisteten Arten von Entitäten. An dieser Stelle sei angeführt, dass Eigenschaften wie Linienfarbe oder Linienbreite nicht beachtet werden (siehe Kapitel 4 Analyse von Grundrissplänen). Abschließend erfolgt die Zerlegung von Containern wie *INSERT* Entitäten oder Polygonzügen. Alle Zeicheninhalte mit relativen Koordinaten werden dafür in das Weltkoordinatensystem konvertiert. Inhalte von nicht sichtbaren oder ausgeblendeten Ebenen werden nicht weiter beachtet. Schlussendlich wird der ausgelesene Inhalt grafisch wiedergegeben als auch in eine Graphenstruktur überführt.

Die verwendete Graphenstruktur divergiert dabei stark von jener häufig in der Literatur beschriebenen. Unter anderem wird in [DGF12], [ZZW14], [LYYC07] und [ZLF03] von Graphen ausgegangen, bei welchen Knoten Liniensegmente repräsentieren und Kanten bestimmte Relationen dieser Elemente wiedergeben. Vor allem Relationen wie Parallelität oder Orthogonalität von Linien können damit effizient gespeichert und abgerufen werden. Solche Relationen von Elementen werden vor allem für das Auffinden von Wänden und Symbolen verwendet. In dieser Arbeit orientiert sich der Graph an eine geometrische

Darstellung der CAD-Zeichnung. Knoten repräsentieren Koordinaten und Kanten definieren die jeweiligen Liniensegmente zwischen diesen Punkten. Auffinden von parallelen Elementen ist dadurch zwar rechenintensiv, wird aber unter anderem für die Erkennung von Wänden und Symbolen nicht vorausgesetzt. Eine mögliche Erweiterung wäre die Kombination beider Graphstrukturen.

Wie angemerkt stellen Knoten im Graphen zweidimensionale Punkte dar und beinhalten damit grundlegende geometrische Informationen der Linien. Jeder Knoten enthält dabei eine Liste an Linienobjekten (Kanten), welche durch diesen Punkt begrenzt werden. Bei den Kanten wird zwischen geraden Linien und Kreisbögen unterschieden. Kreisbögen benötigen unter anderem zusätzliche geometrische Informationen wie Mittelpunkt, Startwinkel und Länge des Winkels. Mit dieser Graphenstruktur lassen sich benachbarte Linien einfach auffinden und ihr gemeinsamer Knoten ist ohne weitere Berechnungen auslesbar. Zudem impliziert dies unter anderem eine triviale Berechnungen von Winkeldifferenzen zwischen benachbarten Kanten.

Bevor der Graph jedoch für Berechnungen herangezogen wird, sind einige grundsätzliche Optimierungen notwendig. So werden anfangs doppelte Kanten entfernt und Knoten mit nahezu identischen Koordinaten zusammengefügt (Grafik (a) in Abbildung 5.3). Die Notwendigkeit dieser Operation entspringt neben numerischen Ungenauigkeiten bei der Wiedergabe von Koordinaten vor allem einem ungenauen Zeichnen (Zeichenfehler). Zusätzlich wird eine Kante geteilt, falls eine weitere Kante an dieser Kante (nahezu) angrenzt (Grafik (b) in Abbildung 5.3). Diese Operation kompensiert verschiedene Möglichkeiten, angrenzende Linien zu zeichnen. Die ursprüngliche Ausgangskante wird für die Suche nach Symbolen beibehalten und ihr wird das UNSPLITTED Flag zugewiesen. Kreuzen sich zwei Kanten und liegt dabei keiner der Knoten (nahezu) auf der jeweils anderen Kante, erfolgt zu diesem Zeitpunkt keine Trennung der Kanten (Grafik (c) in Abbildung 5.3). Außerdem werden im Graph kleine Zusammenhangskomponenten mit maximal drei Kanten als solche markiert. Sie stellen für die meisten Vorgänge in dieser Arbeit auf Grund einer fehlenden Verbindung zu umliegenden Kanten keine notwendigen Informationen bereit.

Für die anschließende Detektierung von Gebäudebestandteilen können den Kanten verschiedene semantische Informationen zugewiesen werden. Beispiel dafür wären Hinweise anhand von Flags, ob die Kante etwa Teil einer Wand oder eines Balkones bildet. Kanten von Wandöffnungen besitzen neben Informationen über das Tür- oder Fenstersymbol auch den Hinweis, dass sie Bestandteil einer Wand sind. Begrenzt eine Kante eine Fläche wie etwa eine Wand oder einen Raum, werden Informationen über diese Flächenbegrenzung durch Festlegen der Kanten-Ausrichtung anhand von Normalvektoren dargestellt. Abbildung 5.4 veranschaulicht die Bedeutung dieser zugefügten Informationen. Kanten, welche einen Teil einer Wand bilden, sind in Grafik (a) durch eine rote Markierung hervorgehoben. Solchen Kanten wird das WALL Flag zugefügt. Außerdem wird durch den von Kanten ausgehenden Pfeil ihre Ausrichtung ersichtlich. Diese Ausrichtung wird folgend als *Normalvektor der Kante* bezeichnet und zeigt immer orthogonal zur Kante in das Innere der jeweiligen Fläche (in diesem Fall die Wandfläche). Grafik (b) beinhaltet einen

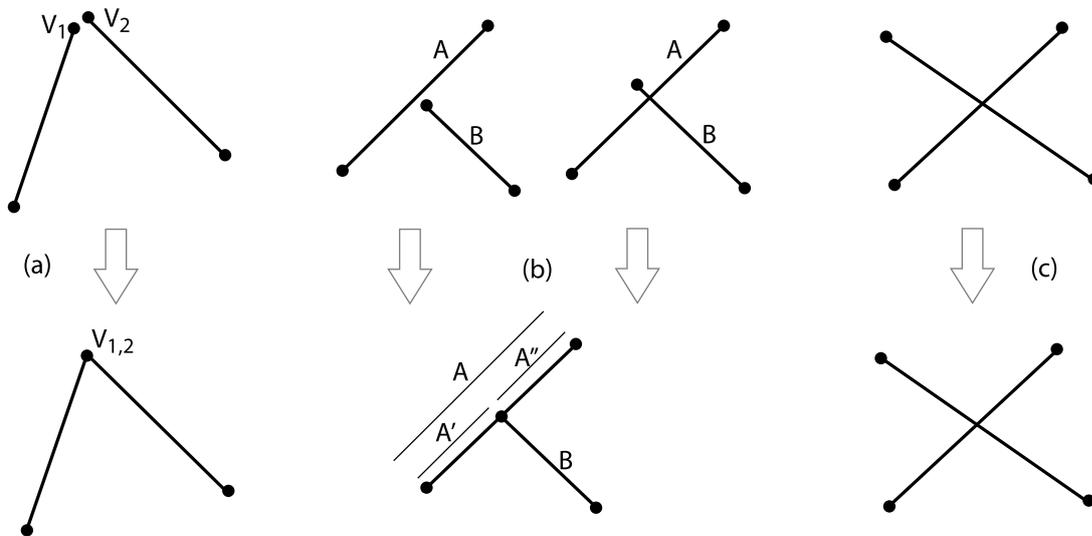


Abbildung 5.3: Grafik (a) Identische Knoten oder Knoten mit geringer Distanz zueinander (V_1 und V_2) werden zusammengefügt ($V_{1,2}$). Grafik (b) Teilung von Kanten (A), an welche weitere Kanten (B) angrenzen. Die ursprüngliche Kante (A) wird neben den neu erstellten Kanten (A' und A'') beibehalten. Grafik (c) Sich kreuzende Kanten werden nicht verändert.

Ausschnitt einer Wand mit eingefügtem Fenster. Rot markierte Kanten sind wiederum Teil der Wand, während blau und grün markierte Kanten wichtige Informationen des Fenstersymbols hervorheben. Kanten mit grüner Markierung wurde das FRAME Flag zugefügt und beschreiben die Abgrenzung der Wandöffnung zur benachbarter Wand. Jene Kanten mit einer blauen Markierung besitzen das OPENING Flag und beschreiben den Verlauf der Wand im Bereich des Symbols. Kanten mit dem FRAME Flag oder OPENING Flag beinhalten ebenfalls das WALL Flag, da sie neben dem Beschreiben von Tür- und Fensteröffnungen auch Informationen über die umliegende Wand verfügen. Die Richtung des Normalvektors der Kante ist dabei abhängig vom jeweiligen Flag.

5.3 Erkennen von Wandöffnungen

Nach Erzeugen der Graphenstruktur aus einer eingelesenen Grundrisszeichnung wird durch strukturelles Abgleichen versucht Tür- und Fenstersymbole aufzufinden. Anhand detektierter Symbole werden im nächsten Schritt daraufhin angrenzende Wandflächen erkannt.

Die Suche nach Wandöffnungen kann in zwei Teilbereiche gegliedert werden. Eine automatische Detektion der Wandöffnungen bedient sich an strukturellem Vorwissen über die Symbole. Wie unter anderem vorhin in Abschnitt 4.1 Wandöffnungen näher beleuchtet,

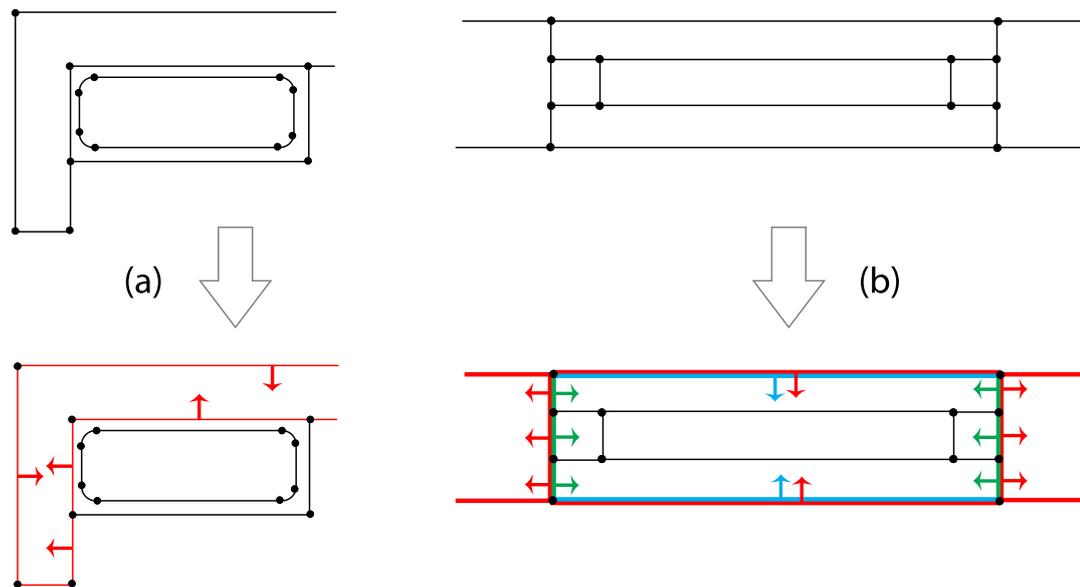


Abbildung 5.4: Grafik (a) oben: Ausschnitt einer Wand mit angrenzender Badewanne. Grafik (a) unten: Visuell hinzugefügte Informationen über die aufgefundene Wand. Rot markierte Kanten sind Teil der Wand und der zugehörige Pfeil definiert den Normalvektor der Kante und zeigt orthogonal ins Wandinnere. Grafik (b) oben: Ausschnitt einer Wand mit Fenster. Grafik (b) unten: Visuell hinzugefügte Informationen der aufgefundene(n) Wand und des Fensters. Kanten mit einer rot/blauen Markierung beschreiben die Fensteröffnung, rot/grün markierte Kanten die Verbindung zwischen Wand und Fenster.

können Tür- und Fenstersymbole durch viele unterschiedliche Formen dargestellt werden. Zudem folgt die Erstellung dieser Symbole keinem obligatorischen Zeichenstil. Eine vollautomatische Erkennung aller Symbole ist daher nahezu unmöglich. Ein zusätzlicher halbautomatischer Ansatz orientiert sich an einer von dem Anwender oder der Anwenderin verwalteten Symbol-Bibliothek, mit deren Hilfe weitere Wandöffnungen generisch aufgefundene werden können. Je nach eingelesenem Grundrissplan können diese beiden Vorgehensweisen sich ergänzend als auch alleinstehend eingesetzt werden. Die beiden folgenden Abschnitte beschreiben das grundlegende Konzept sowie den Aufbau dieser Ansätze.

5.3.1 Automatische Erkennung durch strukturelles Vorwissen

Die automatische Erkennung von Türen und Fenstern basiert auf dem Auffinden von vordefinierten strukturellen Mustern und Charakteristiken. Häufig in Grundrisszeichnungen verwendete Symbole wurden analysiert und Gemeinsamkeiten gesucht. Wichtig ist ein stabiler und effektiver Ansatz über verschiedene Arten von Plänen hinweg, ohne falsche

Positive zu erzeugen. Türöffnungen sollen neben einer fehlenden direkten Verbindung zur angrenzenden Wand zudem auch ohne eingezeichnetes Türsymbol auffindbar sein, da die Analyse von Grundrissplänen aufzeigte, dass manche einfache Zeichnungen auf Türsymbole verzichten.

Die wichtigsten Schritte bei der Detektion von Türen setzen sich wie folgt aufeinander aufbauend zusammen:

1. Suche nach Kandidaten von Wandanschlüssen, welche an einem potentiellen Türsymbol angrenzen. Erstellt wird eine Liste mit all jenen Kanten, welche eine für den Türrahmen passende Länge besitzen. Die Länge muss größer als die minimale Breite eines Türrahmens sein und kann maximal die größte Wandbreite betragen. Erweitert wird dieser Ansatz, indem auch Kantenfolgen mit gleichbleibendem Winkel miteinbezogen werden. Die aufsummierte Länge der Kantenfolge muss dabei wiederum in diesem vorgegebenen Bereich fallen. Im Folgenden wird nun immer von einer Kantenfolge gesprochen, welche sich im einfachsten Fall aus nur einer einzigen Kante zusammensetzt. Die beiden äußeren Knoten der Kantenfolge müssen jeweils mindestens einen Nachbarn aufweisen und werden im nächsten Schritt für die obligatorische Wandanknüpfung herangezogen. Die Kanten dieser aufgefundenen Kantenfolgen bilden den Wandanschluss und müssen zwischen Türbereich und den angrenzenden Wänden verlaufen. Grafik (a) in Abbildung 5.5 verdeutlicht diesen Vorgang durch zwei Beispiele hypothetischer Wandanschlüsse für die Suche nach Türsymbolen. Kante K im ersten Beispiel besitzt insgesamt drei Nachbarn (N_1 , N_2 und N_3). Das zweite Beispiel zeigt eine Kantenfolge bestehend aus zwei Kanten (K_1 und K_2). Die äußeren Knoten der Kantenfolgen besitzen in beiden Beispielen jeweils einen Nachbarn, welche für die obligatorische Wandanknüpfung herangezogen werden.
2. Bilden von Paaren aus den zuvor gefundenen Kantenfolgen. Die beiden Kantenfolgen müssen sich dabei aus gleich vielen Kanten zusammensetzen. Ein solches Paar definiert den Türrahmen und muss eine (nahezu) rechteckige Fläche aufspannen. Die Länge des Rechteckes muss dabei länger sein als die Länge der jeweiligen Kantenfolgen. Jeder äußere Knoten der beiden Kantenfolgen muss zudem einen Nachbarn in einem bestimmten Winkelbereich aufweisen. Diese Nachbarn definieren die angrenzende Wand und können daher nur in eine bestimmte Richtung verlaufen. Grafik (b) in Abbildung 5.5 visualisiert diese Erzeugung von Paaren zuvor aufgefunder Kantenfolgen. Zwei Kandidaten eines Türrahmens (K' und K'') spannen ein Rechteck auf und alle äußeren Knoten der beiden Kantenfolgen besitzen dabei einen Nachbarn mit passendem Winkel.
3. Untersuchen der näheren Umgebung des potentiellen Türbereiches auf Überschneidungen mit anderen Kanten. Die Fläche für die Suche nach solchen Überschneidungen orientiert sich an der Breite der Türöffnung. Erfolgt eine oder mehrere Überschneidungen mit Kreisbögen, handelt es sich höchstwahrscheinlich um eine

Tür. Die Art der Verbindung zwischen Kreisbogen und Türrahmen wird dabei näher untersucht, um etwaige falsche Positive auszuschließen. Sind keine Überschneidungen mit Kanten präsent, kann es sich um eine Türöffnung ohne Türsymbol handeln. Sind Überschneidungen nur im inneren Bereich der Türöffnung vorhanden, kann es sich um ein Symbol einer Schiebetür handeln. Hier gilt die Vorbedingung, dass der Bereich der Tür frei von dekorativen Elementen (etwa Tisch oder Stuhl) und eng anliegenden Wänden ist. In anderen Fällen wird die Türöffnung nicht immer erkannt. Kleine Zusammenhangskomponenten mit maximal drei Kanten werden bei der Überprüfung nach Türöffnungen ohne eingezeichnetem Türsymbol nicht berücksichtigt. Grafik (c) in Abbildung 5.5 verdeutlicht den Bereich, welcher auf Überschneidungen mit anderen Kanten überprüft wird. Die Größe der Fläche orientiert sich an der Distanz w zwischen der Kantenfolgen K' und K'' .

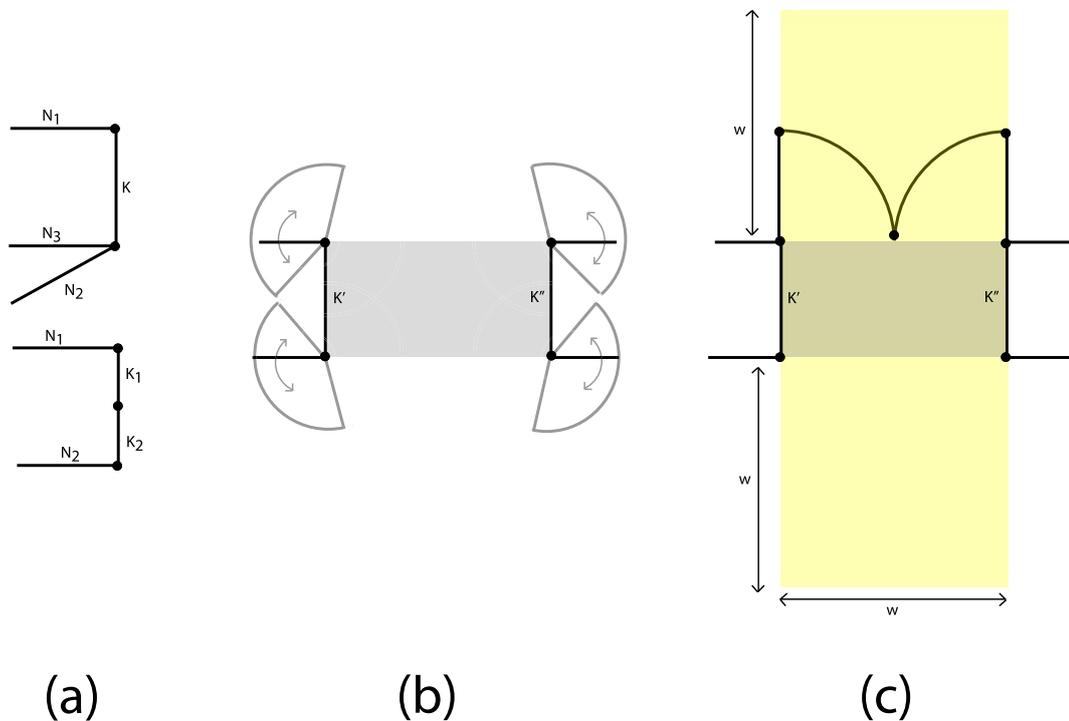


Abbildung 5.5: Wichtige Schritte bei der automatischen Erkennung von Türsymbolen. Grafik (a): Beispiele von Wandanschlüssen, welche für die Suche nach Türsymbolen herangezogen werden. Grafik (b): Bilden von Paaren (Türrahmen) zuvor aufgefunder Wandanschlüsse. Grafik (c): Visualisierung der Fläche im Türbereich, welche auf Überschneidungen mit Kanten überprüft wird.

Wurde eine Tür erkannt, sind weitere Operationen für die anschließende Wandsuche notwendig:

1. Hinzufügen von parallelen Kanten, welche den Wandverlauf im Türbereich definieren (Grafik (a) in Abbildung 5.6). Manche Türsymbole können diese Kanten bereits beinhalten. In diesen Fällen müssen keine neuen Kanten hinzugefügt werden und es reicht die existierenden Kanten mit dem OPENING Flag als Türöffnung zu markieren. Kanten des Türrahmens werden mittels dem FRAME Flag als solche markiert.
2. Berechnen der Normalvektoren von Türrahmen sowie Türöffnung (Grafik (b) in Abbildung 5.6). Dies ist ausschlaggebend für die anschließende Suche nach angrenzenden Wänden.

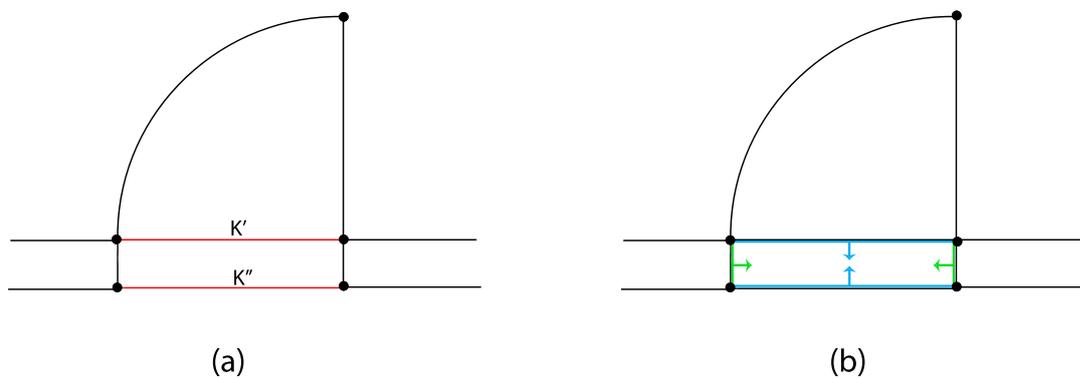


Abbildung 5.6: Grafik (a) Sofern die Kanten K' und K'' , welche den Wandverlauf im Bereich der Wandöffnung wiedergeben, nicht existieren, müssen diese erstellt und dem Graph zugefügt werden. Grafik (b) verdeutlicht die Ausrichtung der berechneten Normalvektoren und das Hinzufügen von Informationen über die Türöffnung. Grün markierte Kanten erhalten das FRAME Flag und blau markierte das OPENING Flag.

Beim automatischen Erkennen von Fenstersymbolen wird auf eine ähnliche Vorgehensweise zurückgegriffen. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass die beiden Kantenfolgen der Wandangrenzungen an den äußeren Knoten in jedem Fall bereits durch eine Kante verbunden sind. Diese Kanten definieren den Wandverlauf im Bereich des Fenstersymbols. Die Fläche der Fensteröffnung wird somit durch bereits existierende Kanten vorgegeben. In einigen Symbolen sind die beiden Kantenfolgen nicht durch jeweils eine, sondern durch eine Folge an Kanten verbunden. Solche Fälle werden mit diesem Ansatz nicht direkt unterstützt, weil dadurch in vielen Plänen die Anzahl an falschen Positiven steigt. Stattdessen wird auf die bei der Erzeugung des Graphen (siehe Abschnitt 5.2 Graph Erzeugung) angesprochenen, nicht aufgeteilten Kanten zurückgegriffen (Kanten mit dem UNSPLITTED Flag). Dabei ist es notwendig, dass die äußeren Knoten der Wandangrenzungen vor dem Teil der Kanten jeweils durch eine einzige Kante direkt verbunden sind. Abbildung 5.7 veranschaulicht diesen Prozess. In Grafik (a) werden dabei zunächst die ursprünglich gezeichneten Linien des Fenstersymbols visualisiert. Die Repräsentation

des Fenstersymbols setzt sich zu diesem Zeitpunkt im Graphen aus mehreren Zusammenhangskomponenten zusammen. Grafik (b) zeigt die Repräsentation des entsprechenden Fenstersymbols nach dem Teilen der Kanten. Rot markierte Kanten stellen dabei die ursprünglich gezeichneten Kanten dar, welche aufgeteilt wurden. Diese Kanten bekommen das UNSPLITTED Flag zugefügt und werden beibehalten. Nach diesem Aufteilen der Kanten setzt sich das Fenstersymbol aus einer einzigen Zusammenhangskomponente zusammen. Ähnlich wie beim Auffinden von Türsymbolen wird auch bei den Fenstern der Bereich der Wandöffnung auf Überschneidungen mit anderen Kanten untersucht. Dabei ist es notwendig, dass zumindest eine Kante vollständig in diesem rechteckigen Bereich der Fensteröffnung liegt.

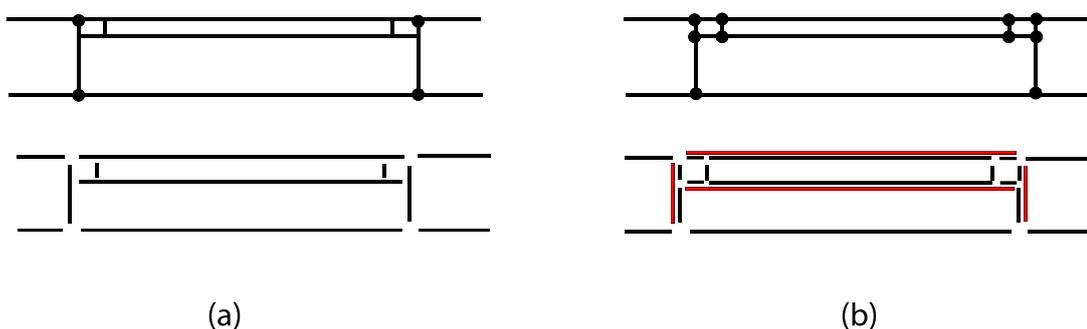


Abbildung 5.7: Automatische Erkennung von Fenstersymbolen durch Miteinbeziehen von Kanten, welche das UNSPLITTED Flag beinhalten. Für ein besseres Verständnis wird in der unteren Darstellung beider Grafiken (a) und (b) das Fenstersymbol jeweils aufgliedert und die einzelnen vorkommenden Kanten somit geeigneter dargestellt.

Gerade bei Fenstersymbolen kann es auf Grund der strukturellen Zusammensetzung dazu kommen, dass ein falsches Fenstersymbol innerhalb des korrekten Symbols gefunden wird. Überschneiden sich aufgefundene Symbole, wird immer das Größere gewählt und alle anderen Kandidaten verworfen. Einige Sonderformen von Symbolen mit spezieller Anknüpfung an Wänden können erst nach der anschließenden Wandsuche eindeutig und ohne viele falsche Positive zu erzeugen erkannt werden. Das hinzukommende Wissen über Kanten, welche Teil der Wandkontur bilden, verkleinert den Suchraum und ermöglicht Bedingungen beim Aufsuchen nach den Wandöffnungen zu lockern. Grundsätzlich wird so vorgegangen, dass Lücken mit einer annähernd rechteckigen Form zwischen Wandsegmenten gesucht werden. Abhängig vom strukturellen Inhalt wird diese Öffnung daraufhin als Tür oder Fenster klassifiziert. Prinzipielle Unterscheidung zwischen Tür und Fenster stellen dabei wiederum bereits existierende Kanten bei Fenstersymbolen dar, welche den Wandverlauf im Bereich des Symbols definieren. Unterstützt wird diese Unterscheidung durch Auffinden von Kreisbögen im Fall von Türsymbolen.

Abschließend sei zusammenfassend angeführt, dass bei dieser automatischen Suche nach der groben Struktur einer Wandöffnung ein Kompromiss zwischen Menge an korrekt erkannten Symbolen und Häufigkeit falscher Positiven eingegangen werden muss. Je größer

die Varietät der auffindbaren Symbole, desto unschärfer die vorliegenden Bedingungen beim Suchprozess. Vor allem große Mengen an dekorativen Elementen können daher zu falschen Positiven führen.

5.3.2 Halbautomatische Erkennung mittels Symbolvorlagen

Im Unterschied zum vorher angeführten automatischen Auffinden von Wandöffnungen werden bei diesem Ansatz durch Anfertigen von Symbolvorlagen genauere strukturelle Merkmale herangezogen. Die Graphendarstellung der Grundrisszeichnung wird auf diese Merkmale hin untersucht und ermöglicht damit die räumliche Lokalisierung des entsprechenden Symbols. Notwendige Informationen wie die Angrenzung zu benachbarten Wandsegmenten werden anfangs bereitgestellt als auch nach Auffinden der Symbolstruktur berechnet. Dies umschließt unter anderem die Berechnung des Wandverlaufs im Bereich des Symbols. Wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes ist die generische Erweiterbarkeit durch den Anwender oder der Anwenderin als auch ein effektives Auffinden der entsprechenden Symbole, ohne falsche Positive zu erzeugen. Dennoch sei angemerkt, dass sehr einfach strukturierte Symbole gerade in Plänen mit vielen dekorativen Elementen falsche Positive hervorrufen können. Der Ablauf dieser halbautomatischen Symbolerkennung lässt sich in zwei wesentliche Komponenten gliedern:

- *Bereitstellen der Symbolvorlage*: der Anwender oder die Anwenderin definiert das aufzusuchende Symbol als Teilstruktur des Grundriss-Graphen.
- *Auffinden der Symbolvorlage*: der Graph der Grundrisszeichnung wird auf strukturelle Übereinstimmungen mit der entsprechenden Symbolvorlage untersucht.

Anhand dieser beiden Komponenten wird nun im Folgenden das Konzept der halbautomatischen Erkennung von Wandöffnungen genauer veranschaulicht.

Bereitstellen der Symbolvorlage

Das Erstellen einer Symbolvorlage setzt eine einmalige User-Interaktion voraus. Nach erfolgreicher Erzeugung wird die Vorlage mittels einer Symbolbibliothek verwaltet und kann somit für zukünftige Grundrisspläne herangezogen werden. Notwendig ist dabei das Persistieren und Auslesen der strukturellen Zusammensetzung der Symbolvorlage sowie der enthaltenen semantischen Informationen über das entsprechende Symbol.

Für die Erzeugung der Symbolvorlage kann der Anwender oder die Anwenderin auf zwei unterschiedliche Ansätze zurückgreifen. Zunächst können trivial alle zum Symbol gehörigen Kanten im Graphen der Grundrisszeichnung markiert und ausgewählt werden. Kanten, welche zur Wandangrenzung gehören, sind dabei gesondert mit dem FRAME Flag zu markieren und beinhalten damit notwendige Informationen für die spätere Suche nach angrenzenden Wänden. Daneben sind diese Kanten zudem ausschlaggebend für die Berechnung des Wandverlaufes im Bereich des Symbols. Abbildung 5.8 beinhaltet

ein Beispiel eines vollständig und korrekt markierten Symbols. Eine abschließende Überprüfung der Vorlage nach vollendeter Markierung stellt die korrekte Erfassung sicher. Überprüft wird zunächst, ob das markierte Symbol zusammenhängend ist und in weiterer Folge die strukturellen Eigenschaften der markierten Wandangrenzungen. Eine Wandangrenzung besteht dabei aus einer Anordnung an aneinandergereihten Kanten mit beliebigem Winkeln. Ein korrektes Symbol muss genau zwei und nicht direkt verbundene Wandangrenzungen beinhalten.

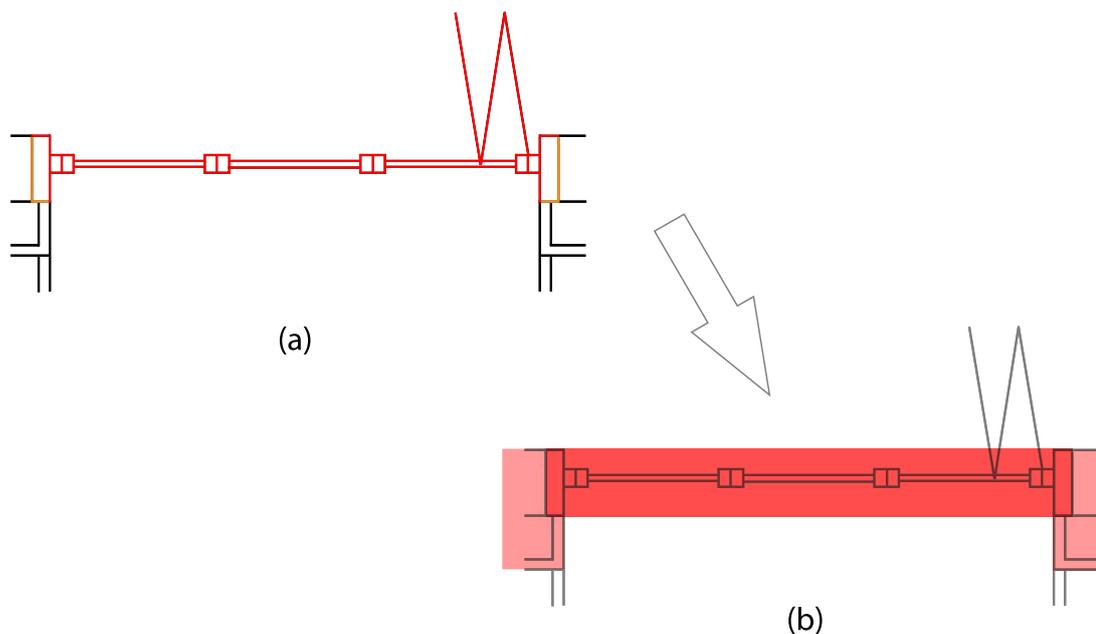


Abbildung 5.8: Grafik (a) beinhaltet ein von dem Anwender oder der Anwenderin markiertes Symbol, welches als Vorlage für das Auffinden gleicher Symbolstrukturen herangezogen werden kann. Rot markierte Kanten sind Bestandteil des entsprechenden Symbols, gelb markierte geben Aufschluss über die Wandangrenzung. Grafik (b) verdeutlicht die anschließend notwendige Erzeugung des Wandverlaufes innerhalb des Symbolbereiches. Dafür wird auf Lage und Form der Wandabtrennungen zurückgegriffen.

Neben dem beschriebenen trivialen Ansatz der vollständigen manuellen Erfassung der Symbolvorlage wurde eine zusätzliche Methode entwickelt. Zielsetzung dieser Vorgehensweise ist den notwendigen manuellen Eingriff zu minimieren. Anstatt das Symbol vollständig manuell zu markieren, muss der Anwender oder die Anwenderin nur eine dem Symbol zugehörige beliebige Kante auswählen. Ein im Zuge dieser Arbeit entwickelter Algorithmus versucht daraufhin, das restliche Symbol automatisch zu erkennen und korrekt zu markieren. Um eine hohe Qualität der Ausgabe zu erreichen, sind für diesen Ansatz folgende Bedingungen an die Symbole gestellt:

- *Symmetrie*: die beiden Wandangrenzungen eines Symbols müssen die gleiche Anzahl an Kanten beinhalten und nahezu gleich lang sein.
- *Isolation*: Abgesehen vom Bereich der Wandangrenzung dürfen am Symbol keine dem Symbol nicht zugehörigen Kanten anknüpfen.

Die wichtigsten Schritte beim Auffinden des Symbols, von welchem die markierte Kante Bestandteil ist, sind folgend angeführt. Das grundlegende Prinzip ist dabei ausgehend von einer Menge an möglichen Symbolkandidaten den geeignetsten auszuwählen. Abbildung 5.9 veranschaulicht diesen Vorgang anhand eines Beispiels. Der entwickelte Algorithmus wurde mehrmals auf Testmengen von Symbolen angewendet und sequentiell an die vorherrschenden Bedingungen angepasst:

1. Von der markierten Kante ausgehend werden alle Kanten im Zuge einer Breitensuche markiert. Diese Kanten müssen sich vollständig in einem groß gewählten Suchradius befinden. Die markierten Kanten und zugehörige Knoten definieren als Teilgraph den Suchraum des aufzufindenden Symbols.
2. Suche nach Paaren von Wandangrenzungen in Form von Kantenfolgen mit identischer Länge und Kantenzahl. Verbindungen zwischen jeweils Start- und Endknoten der beiden Kantenfolgen werden daraufhin gesucht. Diese beiden Verbindungen, ebenfalls in Form von Kantenfolgen mit identischer Länge und Kantenzahl, müssen (nahezu) parallel verlaufen und ihr Abstand zueinander muss im Bereich der Wanddicke liegen. Kann eine solche Verbindung der Wandangrenzungen nicht aufgefunden werden (vor allem bei diversen Türsymbolen), werden Start- und Endknoten der Kantenfolgen der Wandangrenzungen jeweils miteinander direkt durch eine temporäre Kante verbunden. Die Fläche, welche von den beiden Wandangrenzungen und diesen Verbindungskanten aufgespannt wird, beschreibt den Wandverlauf im Bereich des Symbols. An den äußeren Seiten der beiden Wandangrenzungen müssen Wände angrenzen, weshalb sich die markierte Kante nicht in diesem Bereich befinden kann. Stattdessen muss sich diese Kante oberhalb, innerhalb oder unterhalb der im Symbolbereich befindlichen Wandfläche befinden. Falsche Kandidaten können durch diese Überprüfung verworfen werden.
3. Alle Kanten zwischen den beiden Wandangrenzungen werden zum Symbol gezählt. Ist keine Verbindung zwischen den Kantenfolgen der beiden Wandangrenzungen möglich oder werden Kanten außerhalb des Suchradius erreicht, wird der Kandidat verworfen.
4. Von allen Kandidaten wird nun basierend auf generellem Vorwissen über Symbole von Wandöffnungen der geeignetste ausgewählt. Der finale Kandidat wird unter anderem basierend auf Längen- und Breitenvergleiche gewählt. Gesucht wird dabei grundsätzlich nach Kandidaten mit der Kombination einer großen Breite (Wandstärke) bei gleichzeitig kurzer Länge der Wandöffnung.

Bei nicht erkannten, teilweise erkannten oder falsch erkannten Symbolen können mit dem vorhin erwähnten manuellen Ansatz Änderungen vorgenommen werden. Das Aufnehmen des korrekt markierten Symbols in die Symbolbibliothek ist daraufhin möglich und schließt den Vorgang der Erzeugung der Symbolvorlagen ab. Die Graphenstruktur des Symbols als auch die enthaltenen semantischen Informationen über die Wandangrenzungen werden maschinenlesbar im XML-Format gespeichert. Zusätzlich werden noch Informationen über die Art der Wandöffnung zugefügt. Prinzipiell gilt zu unterscheiden, ob es sich beim Symbol um eine Tür oder ein Fenster handelt. Sind ein oder mehrere Kreisbögen vorhanden, wird die Tür als Symboltyp vorgeschlagen, ansonsten das Fenster. Optional können weitere semantische Daten selektiv hinzugefügt werden, wie beispielsweise die Höhe der entsprechenden Wandöffnung.

Auffinden der Symbolvorlage

Nach dem Erstellen von Symbolvorlagen und dem Abspeichern in einer geeigneten Datenstruktur können diese in der Graphstruktur von Grundrissplänen aufgesucht werden. Der entworfene Suchalgorithmus orientiert sich dabei an die bereits vorhin in Abschnitt 3.1 Symbolerkennung in technischen Zeichnungen angeführten Arbeiten [GZW12] [YW03]. Fundamentales Prinzip ist dabei das Auffinden von Teilstrukturen im Graph, welche die strukturellen Bedingungen der Symbolvorlagen erfüllen. Essentielle Schritte dieser Suche sind nachstehend angeführt.

Als Vorbereitung zur Suche nach einer Symbolvorlage wird zunächst eine geeignete Startkante von der Symbolstruktur ausgewählt, durch welche der Suchraum im Graphen eingeschränkt werden soll. Das Ziel ist dabei, von Beginn an so viele Kanten wie möglich für die anschließende Suche auszuschließen. Beinhaltet das aufzufindende Symbol ein oder mehrere Kreisbögen, stellt eines dieser Elemente die gewählte Startkante dar. Dadurch dass in einem typischen Grundrissplan die Anzahl gerader Linienelemente die Anzahl an vorhandener Kreisbögen um ein Vielfaches übertrifft, wird somit nur an wenigen und geeigneten Stellen nach dem Symbol gesucht. Setzt sich die Symbolvorlage nur aus geraden Liniensegmenten zusammen, wird jene Kante mit den meisten Nachbarn ausgewählt.

Kanten mit den strukturellen Eigenschaften der Startkante werden im Graphen anschließend für die Suche nach dem Symbol selektiert. Beginnend bei diesen Kanten wird schließlich versucht die strukturelle Zusammensetzung der Symbolvorlage anhand einer rekursiven Tiefensuche im Graph zu ermitteln. Eine potentielle Symbolkante im Graphen wird dabei mit der entsprechenden Kante in der Symbolvorlage abgeglichen. Relevant ist dabei die Anzahl und Orientierung angrenzender Nachbarkanten. Die Orientierung der Nachbarn, respektive die Winkeldifferenz eines Nachbarn zur aktuellen Kante darf dabei von jener Winkeldifferenz in der Symbolvorlage um einen groß gewählten Faktor abweichen. Durch Setzen solcher beachtlicher Toleranzbereiche lassen sich zudem ähnliche, leicht verzerrte Symbole auffinden. Erweitert wird dieser Ansatz, indem für den strukturellen Abgleich nicht auf Längenrelationen zurückgegriffen wird. Anisotrope Skalierungen von Symbolen sind damit kein Hindernis beim Abgleichen mit

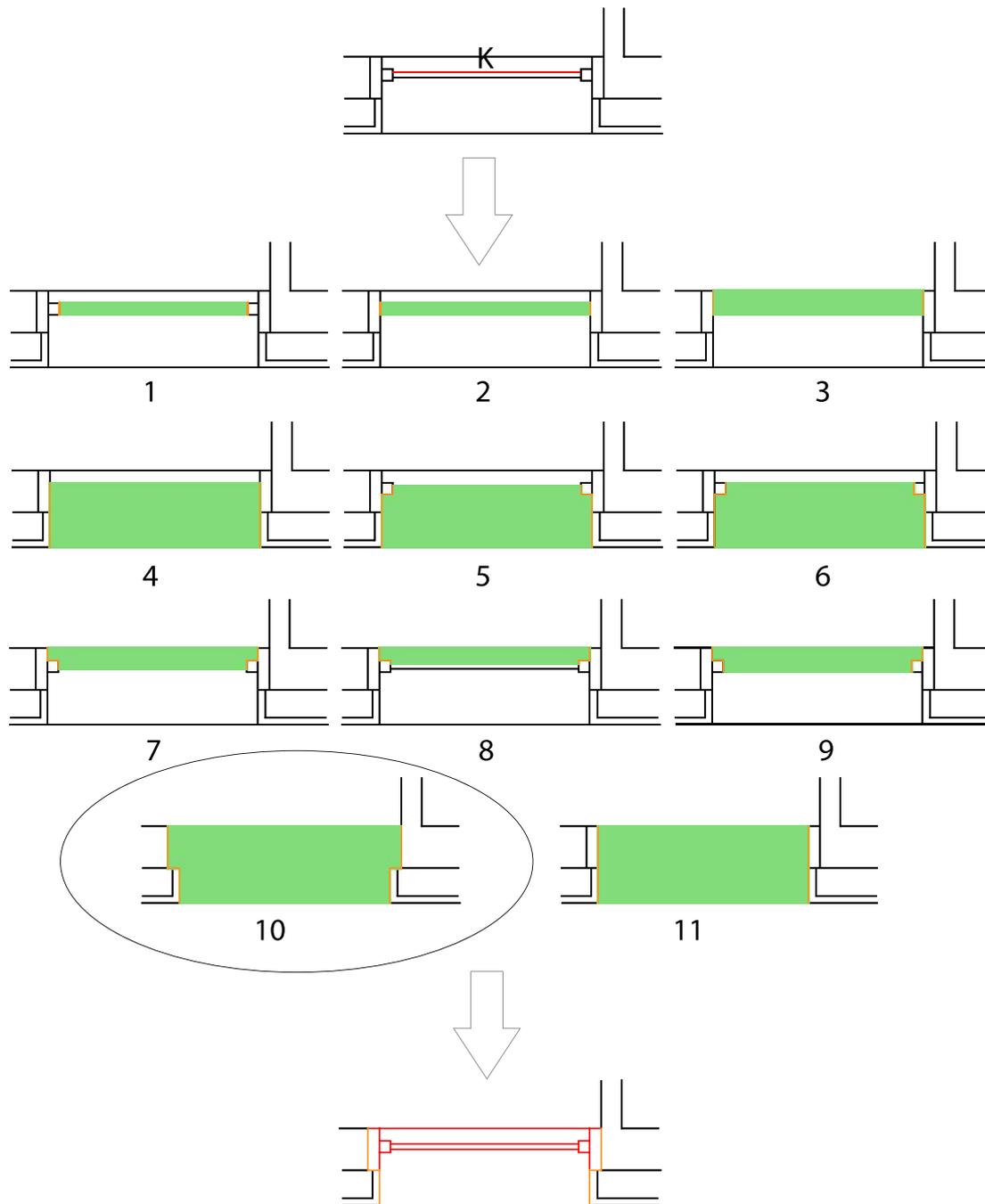


Abbildung 5.9: Im oberen Bereich der Grafik ist ein Ausschnitt des Graphen angeführt und beinhaltet das aufzusuchende Symbol sowie angrenzende Wandsegmente. Ausgehend von der Markierung der Kante K durch den Anwender oder der Anwenderin wird eine Menge an möglichen Symbolkandidaten berechnet. Die gelb markierten Kanten beziehen sich auf die jeweiligen Wandangrenzungen. Die grünen Bereiche visualisieren die von den Wandangrenzungen aufgespannten Wandflächen im Bereich des Symbols. Die Kandidaten werden miteinander verglichen und der geeignetste Kandidat gewählt (Nummer 10). Abschließend erfolgt die Markierung der zum ausgewählten Symbol gehörigen Kanten.

Tabelle 5.1: Auflistung der unterschiedlichen Suchvorgänge pro Startkante. Beim Spiegeln der Symbolvorlage erfolgt eine Invertierung der Winkeldifferenzen. Das Umdrehen der Startkante bezeichnet das Umtauschen von Start- mit Endknoten.

	Symbolvorlage spiegeln	Startkante umdrehen
Suchvorgang 1	nein	nein
Suchvorgang 2	nein	ja
Suchvorgang 3	ja	nein
Suchvorgang 4	ja	ja

der entsprechenden Symbolvorlage. Ein Fenstersymbol kann beispielsweise mit unterschiedlichen Längenrelationen auftreten und dennoch mit einer einzigen Symbolvorlage erkannt werden. Um ergänzend auch gespiegelte Symbole aufzufinden und dadurch dass die Ausrichtung der Startkante im Graphen nicht bekannt ist, wird der Suchvorgang bis zu viermal pro Startkante durchgeführt. Tabelle 5.1 beinhaltet die jeweiligen Unterschiede dieser einzelnen Suchvorgänge und Abbildung 5.10 verdeutlicht diverse Verzerrungen und anisotrope Skalierungen von Symbolen, welche durch dieselbe Symbolvorlage aufgefunden werden können. Auch wenn auf Längenrelationen verzichtet wird und Winkeldifferenzen in groß gewählte Toleranzbereiche fallen dürfen, so ist der gewählte Ansatz dennoch stabil gegenüber falschen Positiven. Begründet wird dies durch den Abgleich struktureller Relationen einer Kante und ihrer gesamten Nachbarschaft. In den angesprochenen Arbeiten [GZW12] und [YW03] wird hingegen durch die Berechnung eines Spannbaumes nur eine Teilmenge der strukturellen Relationen herangezogen und deshalb unter anderem auch genauer auf Längen- und Winkelrelationen eingegangen.

Nach erfolgreicher Detektion einer Symbolvorlage wird die aufgefundene Teilstruktur im Graphen auf obligatorische Wandanschlüsse hin überprüft. Informationen über die beiden Wandangrenzungen sind in der Symbolvorlage enthalten und jeder der vier äußeren Knoten dieser Kantenfolgen muss eine benachbarte Kante in einem bestimmten Winkelbereich beinhalten, welche später als angrenzendes Wandsegment deklariert wird. Ebenfalls ausgehend von diesen Wandangrenzungen wird der Wandverlauf innerhalb des Symbolbereiches berechnet. Dies schließt die Berechnung der Normalvektoren relevanter Kanten mit ein. Wanddicke als auch Länge des Symbols müssen über realistische Maße verfügen, um die aufgefundene Struktur schlussendlich als korrekte Wandöffnung zu klassifizieren.

Abschließend seien noch Problematiken dieser Detektion von Wandöffnungen durch strukturelles Abgleichen kurz diskutiert. So wird etwa die Erkennung eines Symbols mit struktureller Mutation aufgrund angrenzender Kanten durch den exakten Abgleich der Strukturen erschwert. Vor allem Fenstersymbole grenzen in manchen Fällen direkt an beispielsweise dekorative Elemente wie Tische an und können daher verglichen mit der Symbolvorlage kleinere strukturelle Unterschiede aufweisen. Der einfachste Lösungsansatz, jedoch verbunden mit zusätzlichem manuellen Aufwand ist die Anfertigung angepasster Symbolvorlagen. Neben dem ungewollten manuellen Eingriff kann dieser Vorgang schnell

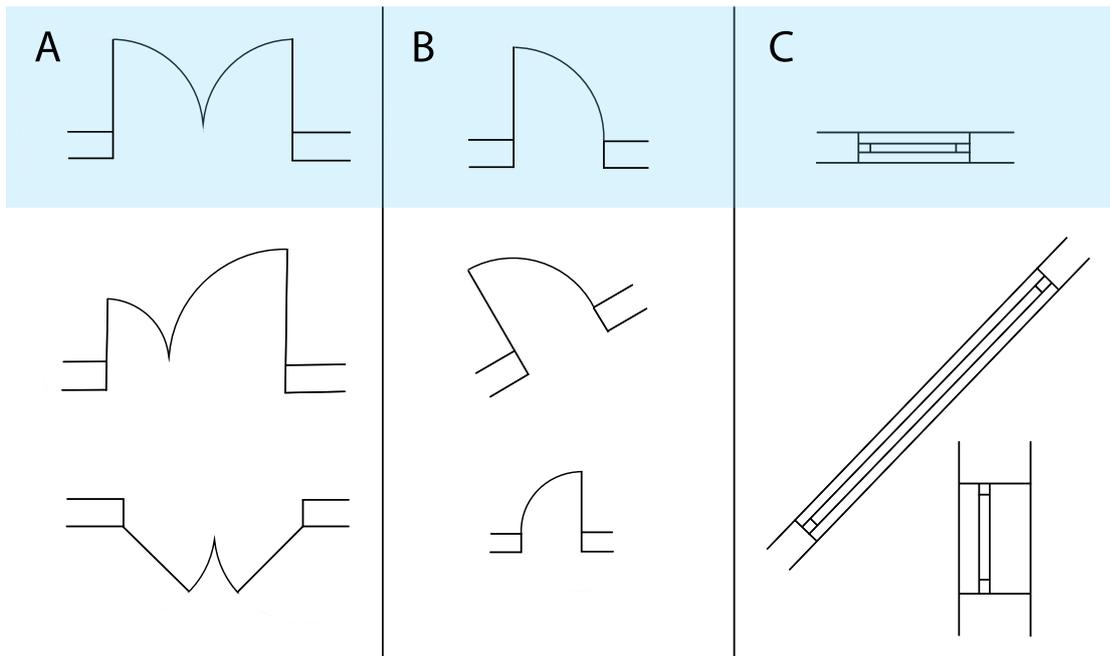


Abbildung 5.10: Beispiel von Symbolvariationen, welche durch dieselbe Symbolvorlage detektiert werden können. Die Symbolvariationen in Spalte A verdeutlicht den Vorteil der groß gewählten Toleranzbereiche beim Abgleichen der Winkeldifferenzen. Neben uniformer Skalierung und Rotation von Symbolen zeigt Spalte B ein Beispiel eines gespiegelten Symbols. Spalte C bezieht sich auf nicht uniforme Skalierungen von Symbolen.

zu einer unübersichtlichen und überfüllten Symbolbibliothek führen. Stattdessen wird auch hier wiederum auf nicht aufgeteilte Kanten, welche das UNSPLITTED Flag beinhalten, zurückgegriffen. Dieser Vorgang wird in Abbildung 5.11 anhand eines Beispiels verdeutlicht. Die in der Grafik (a) dargestellte Symbolvorlage kann das Symbol im gezeigten Grundriss (Grafik (b)) nicht auffinden. Durch das direkt angrenzende dekorative Objekt weist das Symbol eine zur Vorlage abweichende Struktur auf. Die zum Symbol gehörige Linie zwischen Knoten K_1 und K_2 wird an zwei Stellen geteilt (rote Punktmarkierungen). Dekorative (oder sonstige) Elemente werden meistens erst nach dem Erstellen der Wände und Wandöffnungen erzeugt und in vielen solcher Gegebenheiten kann davon ausgegangen werden, dass die Knoten K_1 und K_2 in der Grundrisszeichnung ursprünglich direkt durch eine einzige Linie verbunden sind. Daher wird bei der Detektion nach Symbolen auf die in Abschnitt 5.2 Graph Erzeugung angesprochenen noch nicht aufgeteilten Kanten zurückgegriffen. Zusätzlich könnten benachbarte Kanten mit selbem Winkel temporär als zusammengehörige Kante dargestellt werden und ermöglichen somit kleinere strukturelle Unterschiede zu überbrücken. Nachteilig sei jedoch der dadurch anwachsende Berechnungsaufwand und die zunehmende Gefahr falscher Positive genannt.

Nicht zusammenhängende Symbole oder Symbole, welche nicht direkt an die benachbarten

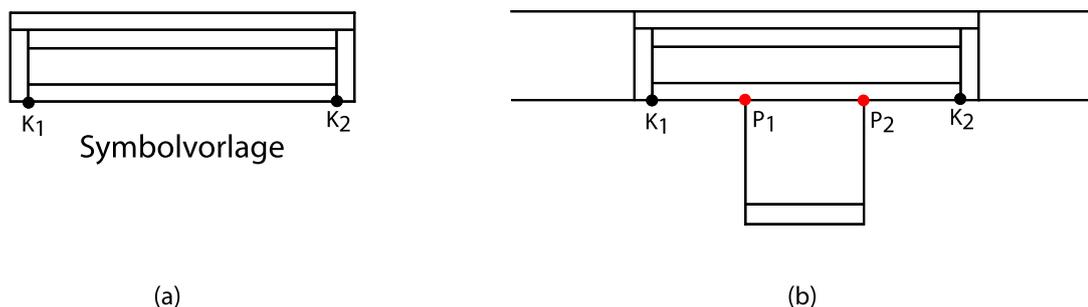


Abbildung 5.11: Beispiel von strukturellen Abweichungen beim Auffinden von Symbolvorlagen. Kanten mit dem UNSPLITTED Flag verhelfen in vielen Fällen solche strukturelle Differenzen aufzuheben.

Wände angrenzen, können durch diesen Ansatz nur teilweise erkannt werden. Zusätzliche Relationen für Kanten ohne einen gemeinsamen Knoten müssen für diesen Sachverhalt definiert werden. Analysen von Grundrissplänen verdeutlichen, dass solche Symbole in Grundrissplänen selten auftreten, weshalb dieser Sonderfall aktuell nicht genauer untersucht wurde. Einen weiteren Sonderfall stellen bestimmte Türsymbolen dar, bei welchen der genaue Verlauf der Wand nicht eindeutig berechnet werden kann. Wie Abbildung 5.12 verdeutlicht, fehlen in solchen Situationen Informationen über die korrekte Wanddicke.

5.4 Erkennen von Wänden

Nach erfolgreicher Detektion von Türen und Fenstern können ausgehend von diesen Wandöffnungen angrenzende Wände verfolgt und erkannt werden. Grundlegendes Prinzip ist dabei die Ausrichtung der Kanten (definiert durch den Normalvektor) für das Bestimmen des Wandverlaufes heranzuziehen. Kanten der Wandangrenzungen aufgefundener Wandöffnungen besitzen das FRAME Flag und der zugehörige Normalvektor zeigt in das Innere der entsprechenden Wandöffnung. Diesen Kanten wird für die Wanddetektion zusätzlich das WALL Flag mit einer invertierten Ausrichtung hinzugefügt, wodurch die Kantenausrichtung in das Innere der angrenzenden und aufzufindenden Wandfläche zeigen muss. Angelegt an dem Prinzip von Füllalgorithmen für Rastergrafiken werden angrenzende Wandflächen als polygonale Flächen erfasst. Abbildung 5.13 verdeutlicht dieses Konzept. Grafik (a) beinhaltet einen Ausschnitt einer Wand mit zuvor aufgefundenem Türsymbol. Kanten K_1 und K_2 definieren die Wandangrenzung der erkannten Wandöffnung. Grüne Pfeile visualisieren die Ausrichtung dieser Kanten in Zusammenhang mit dem FRAME Flag, rot markierte Pfeile die Ausrichtung in Zusammenhang mit dem WALL Flag. Wie in Grafik (b) ersichtlich, wird für eine Kante mit dem WALL Flag die nächste Kante der Wandfläche basierend auf dem Normalvektor aus der jeweiligen Menge an angrenzenden Nachbarn selektiert. Gewählt wird dabei jene benachbarte Kante, durch welche der aufge-

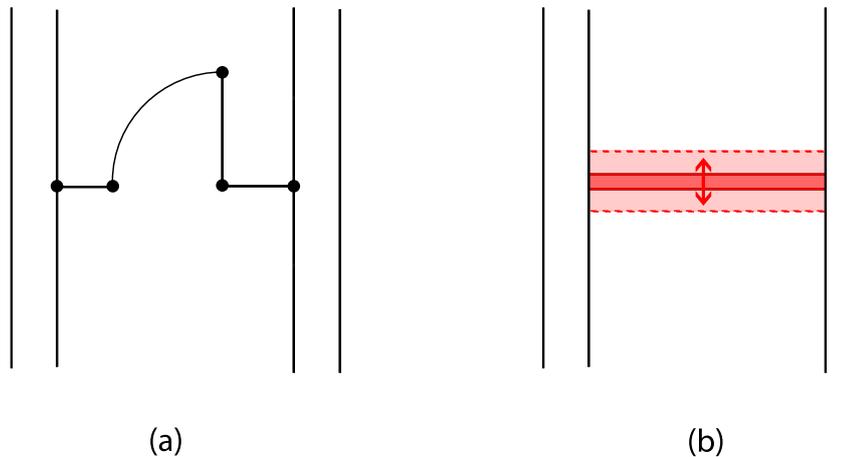


Abbildung 5.12: Nach erfolgreicher Detektion des in Grafik (a) dargestellten Türsymbols kann die entsprechende Wanddicke im Bereich der Tür, wie in Grafik (b) verdeutlicht, nicht eindeutig berechnet werden. Informationen über die korrekte Wanddicke sind im Symbol nicht vorhanden und die Ausrichtung der angrenzenden Wände erschwert das Bestimmen des Wandverlaufes.

spannte Winkel minimal bleibt. Der Drehsinn dieser Winkelberechnungen ergibt sich aus der Richtung des Normalvektors der Ausgangskante. Der neu aufgefundenen Kante wird anschließend ebenfalls die entsprechende Ausrichtung und das WALL Flag zugewiesen. Grafik (c) zeigt das Ergebnis nach wiederholter Durchführung dieser Operation. Der Vorgang wird iterativ solange wiederholt, bis keine neuen Kanten aufgefunden werden können. In anderen Worten bedeutet dies, dass der Vorgang beendet wird, sobald eine benachbarte Kante bereits das WALL Flag mit selber Ausrichtung besitzt. Das Ergebnis sind geschlossene polygonale Anordnungen von Kanten, deren eingegrenzte Fläche die entsprechende Wand repräsentiert. Grafik (d) visualisiert abschließend die aufgefundene Wandfläche.

Bei der Suche nach den nächsten angrenzenden Wandkanten sind folgende Situationen zu berücksichtigen und zu differenzieren:

1. Die neu aufgefundene Kante beinhaltet keine semantischen Informationen oder genauer gesagt kein WALL Flag und keine Kantenausrichtung. Das WALL Flag und der entsprechende Normalvektor werden der Kante hinzugefügt und die Suche fortgeführt.
2. Die neu aufgefundene Kante beinhaltet bereits Wandinformationen in Form des WALL Flags und der entsprechenden Kantenausrichtung. Der Suchvorgang wird an dieser Stelle abgebrochen und eine geschlossene polygonale Wandfläche ist das Ergebnis.

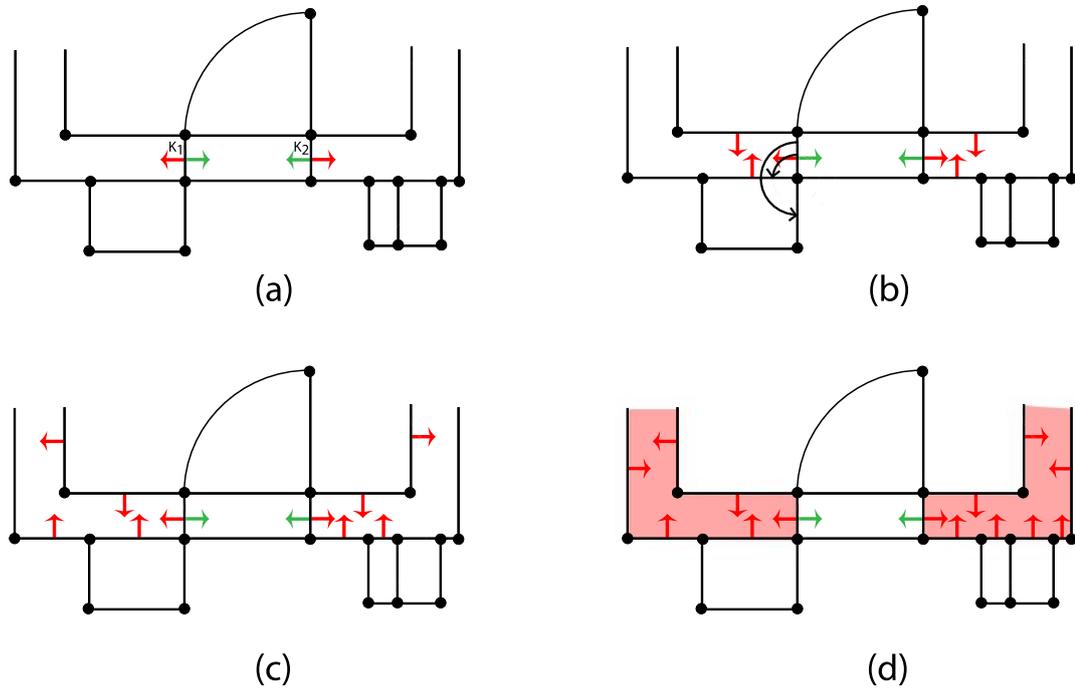


Abbildung 5.13: Konzept der automatischen Wanddetektion, ausgehend von erkannten Wandöffnungen. Grafik (a): Ausschnitt einer Wand mit zuvor aufgefundenem Türsymbol. Grafik (b): am Türsymbol angrenzende Kanten werden als Wandsegment klassifiziert. Gewählt wird dabei jene Kante, welche den kleinsten Winkel zwischen den Wandkanten aufspannt. Grafik (c): Ergebnis nach wiederholter Durchführung dieser Operation. Grafik (d): Hervorheben der aufgefundenen Wandfläche.

3. Die neu aufgefundenene Kante beinhaltet bereits Wandinformationen in Form des WALL Flags jedoch mit invertierter Kantenausrichtung. Solche Ereignisse sind auf wandinternen Details zurückzuführen, wie in Abbildung 5.14 dargestellt. Auf beiden Seiten einer Kante grenzen Wandflächen an, wodurch solche wandinterne Details über eine zweifache Ausrichtung verfügen (Normalvektor in beide Richtungen). Die Suche wird fortgeführt und Kanten mit einer zweifachen Ausrichtung wird das WALL_INTERNAL Flag zugewiesen.
4. Die neu aufgefundenene Kante ist Teil einer zuvor aufgefundenen Wandöffnung mit passender Ausrichtung. Der Suchvorgang kann an dieser Stelle abgebrochen werden und eine geschlossene polygonale Wandfläche ist das Ergebnis. Eine solche Situation ist mit *Punkt 2* vergleichbar.
5. Die neu aufgefundenene Kante ist Teil einer zuvor aufgefundenen Wandöffnung mit invertierter Kantenausrichtung (vergleichbar mit *Punkt 3*). Der Suchvorgang wird

an dieser Stelle infolge eines strukturellen Fehlers abgebrochen. Häufige Ursache ist ein nicht behandelter Zeichenfehler, wie in Abbildung 5.15 zu erkennen. Daneben kann dies auch das Ergebnis von falsch erkannten Wandöffnungen sein.

6. Keine benachbarte Kante ist vorhanden und der Suchvorgang kann daher nicht fortgeführt werden. Die zuletzt aufgefundene Kante wird temporär entfernt und der Suchvorgang an der letzten Wandkante wiederholt. Die Möglichkeit eines schwerwiegenden Zeichenfehlers kann zu diesem Zeitpunkt nicht ausgeschlossen werden.

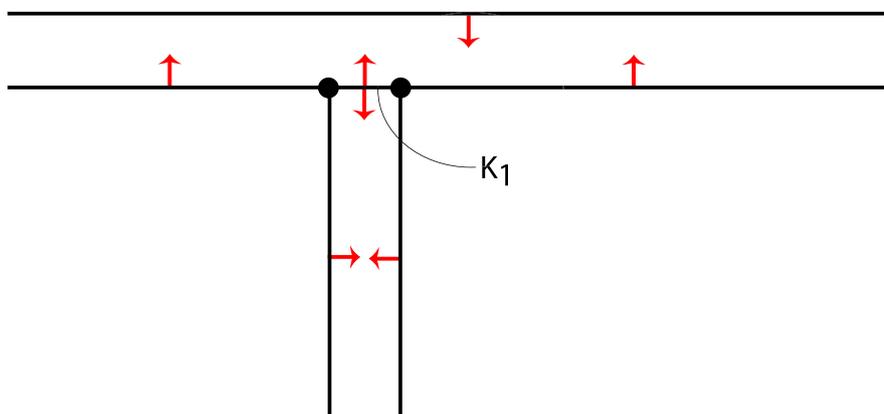


Abbildung 5.14: Beispiel von wandinterne Details. Kante K_1 begrenzt auf beiden Seiten eine Wandfläche und beinhaltet daher eine zweifache Ausrichtung.

Während des Suchprozesses können wandinterne Details die vollständige Detektion von Wandflächen beeinträchtigen. Abhängig von der Anzahl der erkannten Wandöffnungen sowie der Art und Menge an vorkommenden wandinternen Details werden nicht immer alle Wandkanten erreicht und als solche markiert. In diesen Situationen ist ein manueller Eingriff seitens des Anwenders oder der Anwenderin notwendig. Durch Markieren einer noch nicht aufgefundenen Wandkante und dem Hinzufügen der entsprechenden Ausrichtung erfolgt daraufhin automatisiert die restliche Detektion angrenzender Wandkanten. Aufgefundene wandinterne Details in Form von Kanten mit dem `WALL_INTERNAL` Flag beinhalten für anschließende Aktionen keine aussagekräftigen Informationen und werden daher nicht weiter beachtet.

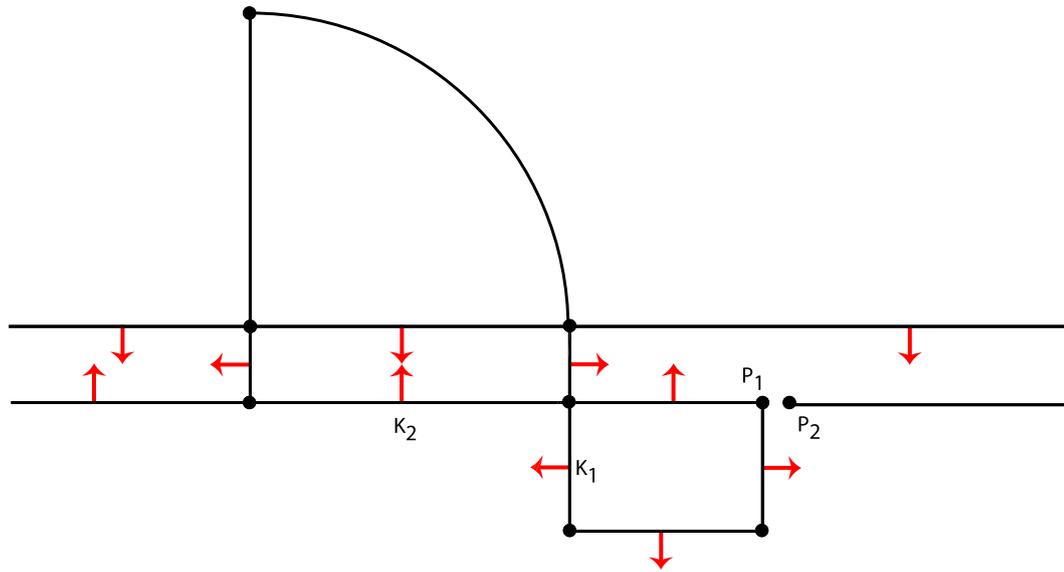


Abbildung 5.15: Beispiel eines strukturellen Fehlers auf Grund eines nicht behandelten Zeichenfehlers. Der Suchvorgang wird an der Kante K_2 abgebrochen, da diese in Vergleich zur vorherigen Wandkante K_1 eine falsche Ausrichtung beinhaltet. Für eine korrekte Durchführung muss Knoten P_1 mit Knoten P_2 vereinigt werden.

5.5 Erkennen von Räumen und Außenflächen

Infolge der durchgeführten geometrischen Erfassung der Wände und darin enthaltener Wandöffnungen ist die elementare strukturelle Zusammensetzung des entsprechenden Gebäudes bekannt. Als nächsten Schritt lassen sich Räume sowie Gebäudeumrisse basierend auf den aufgefundenen Wandkonturen erkennen und lokalisieren. Ausschlaggebend für die topologische Zusammensetzung eines Gebäudes verhelfen Informationen über Raumflächen und der Gebäudekontur zudem mögliche strukturelle Fehler zu eliminieren. So werden etwa alleinstehende Wandöffnungen und Wandsegmente, welche keiner Raumbegrenzung zugehörig sind, als falsche Positive eingestuft. Des Weiteren wird der Inhalt des Grundrissplans in aufschlussreiche Teilbereiche gegliedert. Beispielsweise können die jeweiligen Raumflächen sukzessiv nach Treppenhäusern durchsucht werden, womit die Komplexität eines solchen Erkennungsprozesses vermindert wird. Ähnlich dazu erfolgt ein Auffinden von Außenflächen wie Balkonen und Terrassen nur außerhalb der Gebäudekontur. Beinhaltet ein Grundrissplan mehrere Gebäude respektive mehrere Stockwerke, werden diese durch Informationen über die Gebäudekontur differenziert behandelt. Nachfolgend sind essenzielle Schritte für die Erfassung der Raumflächen als auch der Gebäudekonturen angeführt. Daraufhin wird das Definieren topologischer Relationen zwischen den Gebäudebestandteilen ermöglicht.

Vergleichbar mit der Detektion von Wänden basiert das Auffinden von Räumen auf der

Erzeugung polygonaler Flächen. Abbildung 5.16 verdeutlicht diesen Vorgang. Nach dem Erkennen der Wandflächen werden in Grafik (a) ausgehend von den Türkanten K_1 und K_2 , welche das OPENING Flag besitzen, benachbarte Wandkanten in eine Richtung durchwandert und markiert. Die Markierung der Kanten beinhaltet das Hinzufügen des AREA Flags mit invertiertem Normalvektor. In der Grafik ist dieser invertierte Normalvektor durch einen farbigen Pfeil dargestellt (rot ausgehend von Kante K_1 , blau ausgehend von Kante K_2). Die Ausrichtung der Kanten zeigt entweder in das Innere eines Raums oder in die Fläche außerhalb des Gebäudeumrisses. Dieser Vorgang wird sequentiell wiederholt, bis schlussendlich erneut die Ausgangskante der Türöffnung erreicht wird. Das Ergebnis ist eine geschlossene Kantenfolge in Form eines Polygons, wobei jede Kante das AREA Flag mit selber Ausrichtung aufweist und Bestandteil einer Wand oder Wandöffnung ist. Die durch diese Kantenfolge definierte Fläche wird durch die Ausrichtung der Kanten begrenzt und befindet sich deshalb entweder außerhalb des erzeugten Polygons oder wird dadurch beschränkt. Nachfolgend werden diese zwei möglichen Szenarien genauer diskutiert:

- Die Fläche ist durch die Ausrichtung der Kantenfolge beschränkt und wird deshalb für die Raumbeschreibung herangezogen (Fläche F_1 in Grafik (b) von Abbildung 5.16). Die jeweiligen Kanten der Kantenfolge werden dem Raum zugewiesen und Relationen zwischen dem Raum und den umliegenden Wänden, Türen und Fenstern ermöglicht. Einen Sonderfall stellen durch Türen erreichbare Innenhöfe dar (meistens bei Grundrisszeichnungen von Erdgeschossen) und lassen sich, ohne auf textuelle Beschreibungen oder dekorative Elemente zurückzugreifen, nicht immer eindeutig von Gebäudeinnenflächen unterscheiden.
- Die Fläche wird durch die Kantenfolge nicht beschränkt und beschreibt deshalb keinen Raum (Fläche F_2 in Grafik (b) von Abbildung 5.16). Die entsprechende Kantenfolge einer solchen nicht beschränkten Fläche definiert stattdessen die äußere Kontur des Gebäudes. Einen Sonderfall stellen in diesem Zusammenhang Räume dar, welche sich vollständig innerhalb eines anderen Raums befinden (Abbildung 5.17). Die äußere Kontur eines solchen inneren Raums weist dabei die gleichen Eigenschaften wie die äußere Kontur des Gebäudes auf. Eine Unterscheidung erfolgt durch geometrische Vergleiche der Flächen. Die äußere Kontur eines inneren Raums ist dabei vollständig im umliegenden Raum und damit vollständig in der äußeren Kontur des Gebäudes vorhanden. Die Kontur alleinstehender Wände erzeugt ebenfalls eine nicht beschränkte Fläche. Auch hierbei kann wiederum auf geometrische Vergleiche der erzeugten Flächen zurückgegriffen werden, um solche Ereignisse zu identifizieren.

Kanten von Fensteröffnungen, welche bei diesem Vorgang der Raumerkennung nicht mit einem AREA Flag markiert wurden, sind entweder Bestandteil von Räumen ohne Türen oder Teil einer türlosen Gebäudekontur (meistens bei Grundrisszeichnungen von Obergeschossen). Räume ohne Türen müssen durch eine horizontale Öffnung (etwa Treppenhaus) zugänglich sein, ansonsten werden solche Flächen zur inneren Gebäudekontur

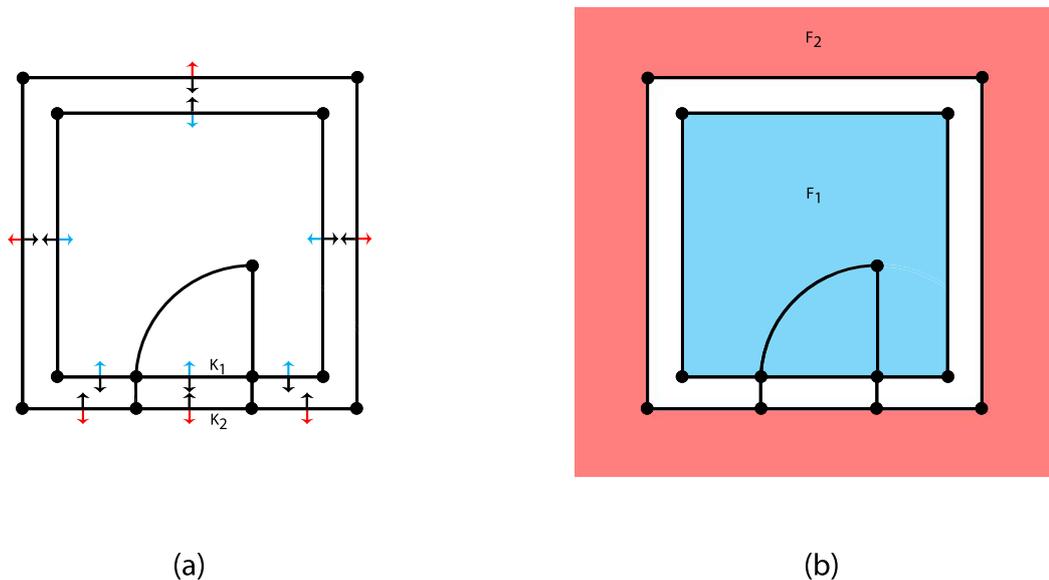


Abbildung 5.16: Erkennen von Raumflächen und Gebäudekonturen anhand des Grundrisses eines einfachen Gebäudes mit einem einzigen Raum. Nach dem Erkennen der Wandflächen werden in Grafik (a) ausgehend von den Türkanten K_1 und K_2 benachbarte Wandkanten sequentiell durchwandert. Grafik (b) verdeutlicht die Flächen, welche sich durch diese durchwanderten Kantenfolgen bilden. Fläche F_1 definiert den Raum des Gebäudes. Fläche F_2 bezieht sich auf die Kontur des Gebäudes.

gezählt. Für die Erfassung dieser Sonderfälle wird die vorhin beschriebene Methode der Raumerkennung erneut durchgeführt und bei Kanten von Fensteröffnungen ohne AREA Flag gestartet.

Im Anschluss an die beschriebene Erfassung der Räume und der Gebäudekontur kann der Anwender oder die Anwenderin horizontale Öffnungen wie Treppenhäuser und Aufzugschächte manuell als polygonale Fläche einzeichnen. Eine effektive automatisierte Erkennung ist auf Grund häufiger struktureller Abweichungen durch verschiedene zeichnerische Darstellungen sowie unterschiedlicher Bauformen der Treppenhäuser kaum möglich (vergleiche Abschnitt 4.4 Treppenhäuser). Aufzugschächte können auf Grund meist nicht eindeutiger Unterscheidung zu anderen Raumflächen ebenfalls nicht effektiv erkannt werden. Eine Differenzierung zwischen türlosen Räumen und inneren türlosen Gebäudekonturen ist nach Identifizieren dieser horizontalen Öffnungen möglich.

Ausgehend von der Gebäudekontur werden abschließend Balkone und strukturell ähnliche Außenflächen wie Terrassen automatisch detektiert. An die Gebäudekontur angrenzende und durch Kantenfolgen begrenzte Flächen stellen Kandidaten solcher Außenflächen dar. Der Ansatz beim Auffinden dieser Kantenfolgen beruht auf dem Prinzip des Füllalgo-

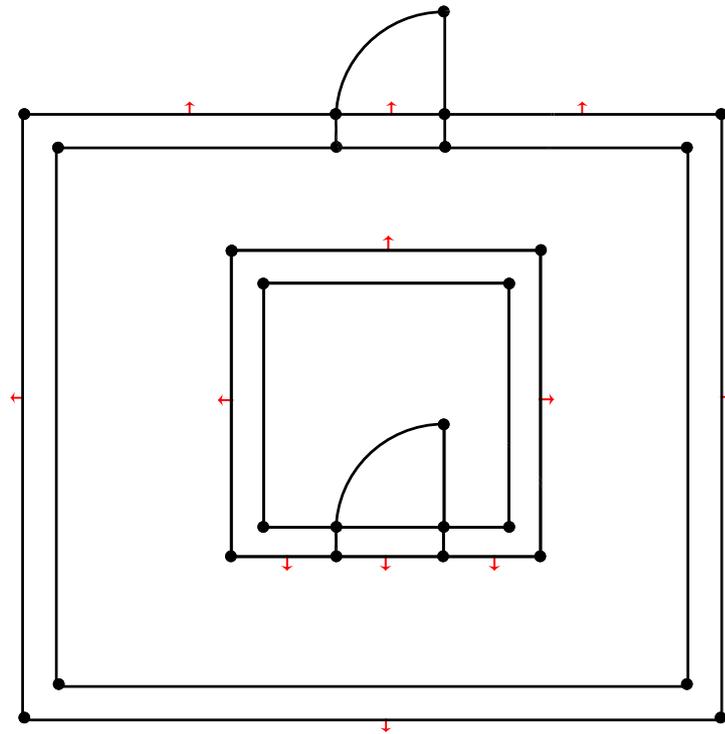


Abbildung 5.17: Beispiel eines Raums, welcher von einem äußeren Raum eingeschlossen wird. Die Kontur des inneren Raums erzeugt dabei wie die Kontur des Gebäudes eine nicht beschränkte Fläche. Die Grafik verdeutlicht dies durch die Ausrichtung der jeweiligen Kantenfolgen.

rhythmus der Wanddetektion. Gestartet wird dabei bei Kanten, welche sich außerhalb der Gebäudekontur befinden und direkt an diese angrenzen. Die Fläche dieser Kandidaten muss dabei eine minimale Größe überschreiten sowie durch mindestens eine Tür mit einem Raum verbunden sein. Wie in Abschnitt 4.5 Balkone angemerkt, können auch Fenstersymbole den Zugang zu Balkonen darstellen und werden deshalb ebenfalls für die notwendige Verbindung zu angrenzenden Räumen herangezogen. Jedoch steigt damit auch die Wahrscheinlichkeit falscher Positive. Bei sich überlagernden Flächen wird die Menge an Kandidaten durch Größenvergleiche auf eine disjunkte Teilmenge reduziert. Abbildung 5.18 verdeutlicht diesen Vorgang anhand eines Beispiels. Ein relativ geringer Flächenunterschied resultiert im Verwerfen des kleineren Kandidaten, ein großer Unterschied im Verwerfen des größeren Kandidaten. Ein geringer Flächenunterschied ist häufig bei Kandidaten vorzufinden, welche sich auf dieselbe Außenfläche des Gebäudes beziehen. Der kleinere Kandidat verläuft dabei innerhalb der eingezeichneten Mauer (oder Geländers) dieser Außenfläche, während der größere Kandidat außerhalb davon verläuft. Bei einem großen Unterschied der Flächen bezieht sich der kleinere Kandidat meist

auf die korrekt gesuchte Außenfläche, während der größere Kandidat beispielsweise die eingezeichnete Grundstücksgrenze oder eine Gartenfläche definiert. Der Schwellwert als Kriterium dieser Unterscheidung orientiert sich dabei an der Fläche der hypothetischen Wand, welche um den jeweils kleineren Kandidaten verläuft.

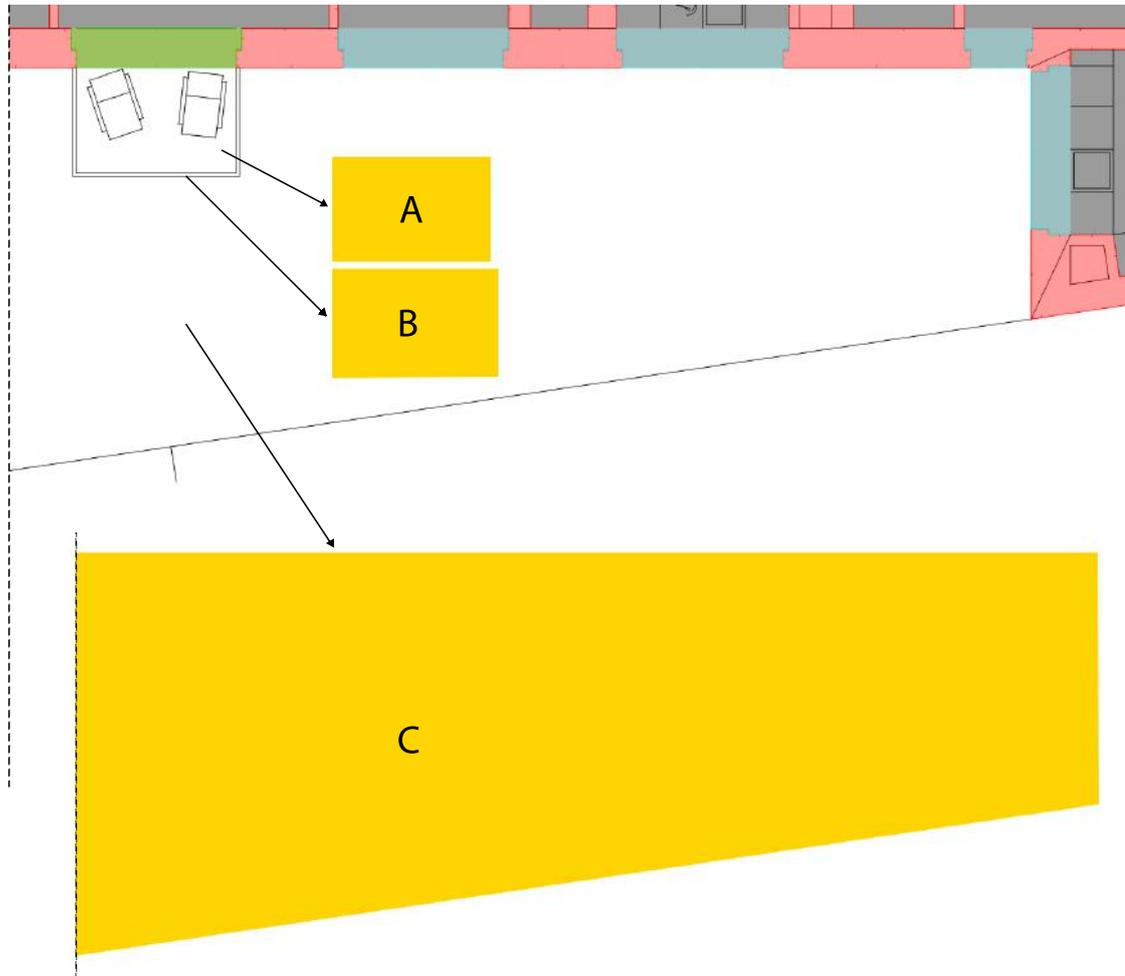


Abbildung 5.18: Beispiel der Detektion von Außenflächen. Im Ausschnitt des dargestellten Grundrissplans wurden drei sich überlappende Außenflächen aufgefunden. Kandidat *C* erzeugt die größte Fläche und überdeckt Kandidat *A* und *B*. Kandidat *B* überlagert die Fläche des kleinsten Kandidaten *A*. Beginnend bei der kleinsten Fläche wird Kandidat *A* verworfen, da die Fläche von Kandidat *B* nur minimal größer ist. Der Flächenunterschied zwischen Kandidat *B* und *C* ist als Darstellung einer Wand (oder Geländer) zu groß, weshalb Kandidat *C* ausscheidet und Kandidat *B* als finale Fläche des Balkons gewählt wird.

5.6 IFC-Export

Die Beschreibung und das Abspeichern der aufgefundenen Gebäudebestandteile durch das IFC-Datenmodell schließt den Prozess der dreidimensionalen Gebäudemodellgenerierung ab. Wie in Abschnitt 2.3 IFC-Datenmodell einleitend beschrieben, beinhalten die IFC eine semantische Beschreibung sowie eine geometrische Repräsentation des jeweiligen Gebäudes. Nachstehend erfolgt eine Auflistung und Veranschaulichung grundlegender IFC-Entitäten, die für die Beschreibung der erkannten Gebäudeelemente herangezogen werden:

- *IfcWall* für das Beschreiben der aufgefundenen Wandflächen. Ein geschlossener Polygonzug bestehend aus geraden Linien sowie Kreisbögen definiert die Wandkontur und wird um eine bestimmte Höhe orthogonal zur Grundfläche extrudiert. Für die Darstellung der Wandkonturen als geschlossene Polygonzüge ist eine Unterteilung der Wandflächen in disjunkte Teilflächen notwendig (Abbildung 5.19). Ein im Zuge dieser Arbeit entwickelter Algorithmus durchschneidet dafür durch Erzeugen von Schnittkanten die Wandflächen an existierenden Eckpunkten (Knoten im Graphen). Diese Menge an generierte Kandidaten für das Unterteilen der Wandflächen wird durch geometrische Vergleiche auf eine geeignete Teilmenge dezimiert. Unter anderem wird dafür bei sich überschneidenden Kandidaten nur der kürzeste beibehalten. Kandidaten solcher Schnittlinien, welche zu einer zu kleinen Wandfläche führen, werden ebenfalls entfernt. Eine weitere Regel setzt voraus, dass die aufgeteilten Wandflächen aus nicht zu spitz zulaufenden Kanten (kleiner aufgespannter Winkel) bestehen dürfen.
- *IfcWindow* für das Beschreiben der aufgefundenen Fenster. Fensterflächen werden als geschlossene Polygonzüge erkannt und können geometrisch unverändert übernommen werden. Der Polygonzug wird um die jeweilige Fensterhöhe orthogonal zur Grundfläche extrudiert.
- *IfcDoor* für das Beschreiben der aufgefundenen Türen (analog zu Fenstern).
- *IfcSpace* für das Beschreiben der aufgefundenen Innen- und Außenflächen des Gebäudes. Geometrisch repräsentiert werden diese Flächen durch einen geschlossenen Polygonzug, welcher um eine bestimmte Höhe orthogonal zur Grundfläche extrudiert wird. Innere Abgrenzungen einer Raumfläche sind durch Hinzufügen zusätzlicher Polygonzüge definierbar. Dies ist unter anderem beim Auftreten von Räume in umliegenden Räumen notwendig. Ergänzend werden durch diese IFC-Entität Relationen zwischen Räumen und den zugehörigen Wänden beschrieben.
- *IfcSlab* für das Beschreiben horizontaler Abgrenzungen der erkannten Gebäudeelementen. Boden- und Deckenfläche werden basierend auf der äußeren und (falls vorhanden) inneren Gebäudekontur definiert. Für die Beschreibung des Bodens von Außenflächen werden jeweils eigene Instanzen generiert. Die geometrische Repräsentation erfolgt hierbei wiederum mit geschlossenen Polygonzügen welche um eine

bestimmte Höhe orthogonal zur Grundfläche extrudiert werden. Polygonzüge der inneren Gebäudekonturen werden für die inneren Abgrenzungen der zu extrudierende Flächen herangezogen.

- *IfcOpeningElement* für das Beschreiben von vertikalen Öffnungen in Wänden und horizontalen Öffnungen in Boden- und Deckenflächen. Relationen zwischen Wänden und den einzufügenden Türen und Fenstern werden über diese Entität erstellt. Die vertikale Öffnung in der Wand ist dabei gleichzusetzen mit der Größe des jeweiligen Tür- oder Fensterelements. Für Fensteröffnungen wird zusätzlich ein vertikaler Versatz angegeben und definiert den Abstand der Fensteröffnung zum Boden.

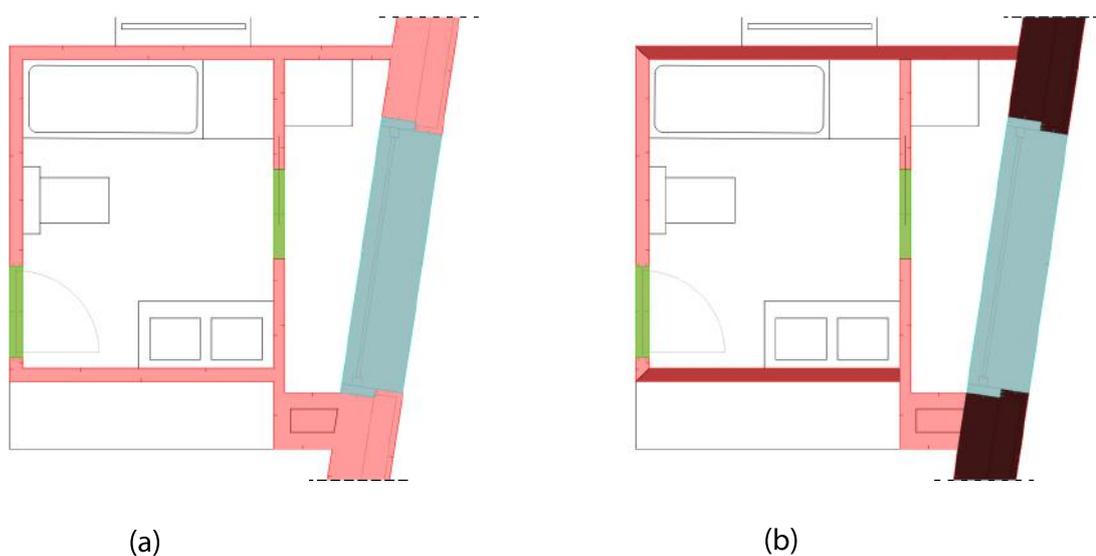


Abbildung 5.19: Unterteilen der aufgefundenen Wandflächen. Grafik (a) zeigt einen Ausschnitt eines Grundrissplans mit detektierten Wandöffnungen und Wänden. Wandflächen lassen sich dabei nicht durch einen geschlossenen Polygonzug beschreiben und müssen in geeignete disjunkte Teilflächen unterteilt werden, wie in Grafik (b) visualisiert.

Abschließend zeigt Abbildung 5.20 ein Beispiel eines erkannten Grundrissplans und das resultierende dreidimensionale Gebäudemodell. Grafik (a) repräsentiert den in die Applikation eingelesenen Grundrissplan. Grafik (b) verdeutlicht die mit der Applikation aufgefundenen Gebäudebestandteile sowie das manuell markierte Treppenhaus. Grafik (c) zeigt das finale Ergebnis anhand der visuellen Darstellung der erzeugten IFC-Datei durch das Betrachtungsprogramm *BIM Vision*. Die Decke des Stockwerkes wurde für eine geeignetere Visualisierung ausgeblendet. Für die Höhenangaben der Gebäudeelemente wurden Standardwerte herangezogen. Die erzeugte IFC-Datei kann mit einem beliebigen IFC-Betrachtungsprogramm geöffnet und visualisiert werden als auch den Input für weiterführende Anwendungen bilden.

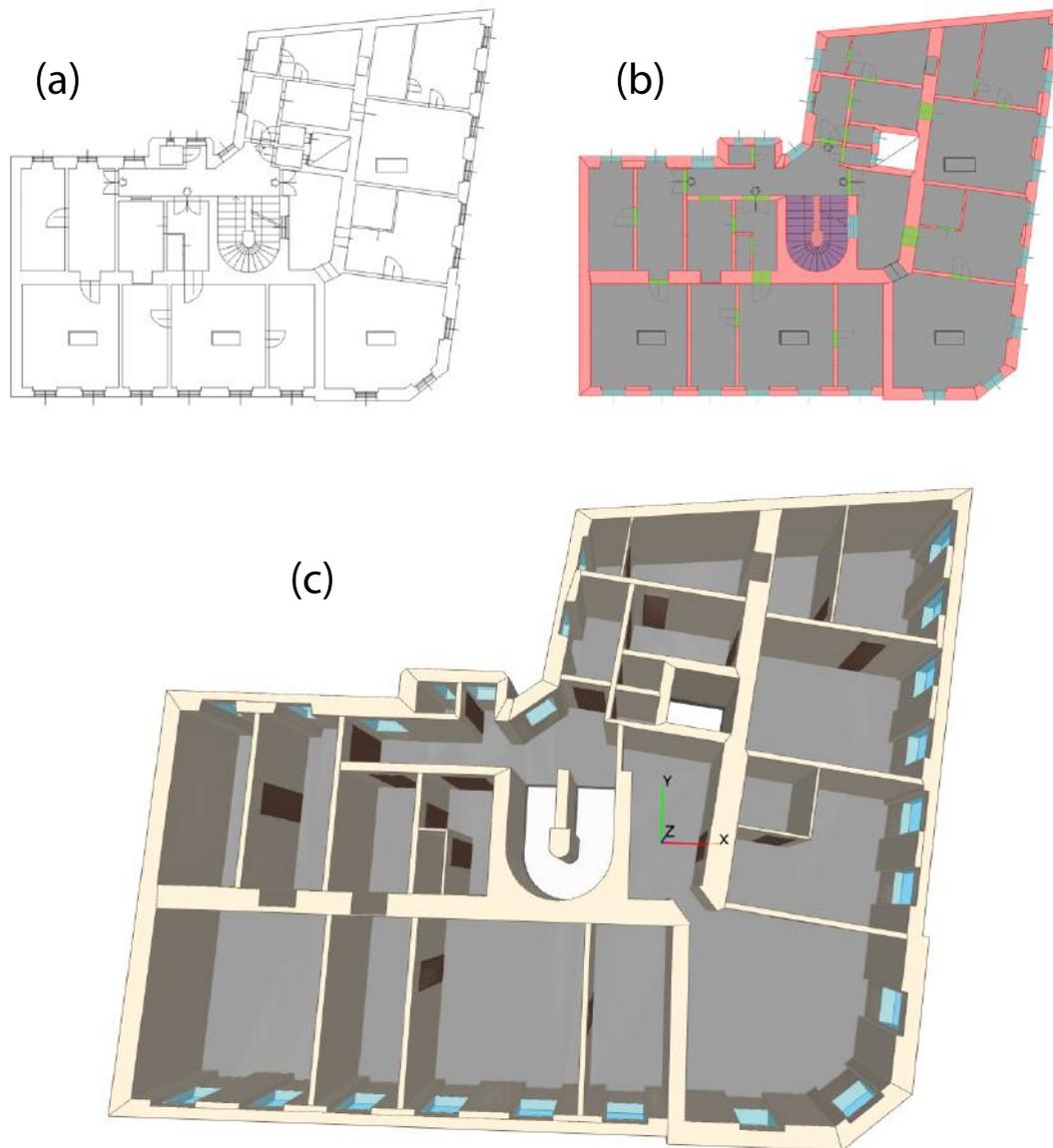


Abbildung 5.20: Generierung des dreidimensionalen Gebäudemodells aus einem CAD-Grundrissplan. Grafik (a): eingelesener Grundrissplan. Grafik (b): aufgefundene Gebäudebestandteile. Grafik (c): visuelle Darstellung der erzeugten IFC-Datei.

5.7 Grafische Benutzeroberfläche

Abbildung 5.21 zeigt die grafische Oberfläche der Anwendung *CAD2IFC* während der Erfassung eines geöffneten Grundrissplans. Die Oberfläche ist in zwei elementare Bereiche

zu unterteilen. Zunächst bezieht sich der Großteil der Oberfläche auf die grafische Wiedergabe des eingelesenen Grundrissplanes. Insbesondere dient dieser Bereich der visuellen Überprüfung von erkannten Inhalten. Daneben werden Interaktionen wie die Markierung und Manipulation von einzelnen Linien als auch von erkannten Gebäudebestandteilen wie Türen oder Wänden ermöglicht. Ein Verschieben, Vergrößern sowie Verkleinern der dargestellten CAD-Pläne unterstützt gleich wie ein temporäres Ausblenden verschiedener Kanten (gruppiert nach Flags) diese Interaktionen. Ergänzt wird die grafische Repräsentation der Grundrisszeichnung durch verschiedene Kontrollpanels. Diese werden am rechten Rand der Applikation durch Registrierkarten angeordnet und im Folgenden näher beleuchtet:

- *Layers*: Beinhaltet von der CAD-Zeichnung ausgelesene Ebenen, deren Inhalte optional ausgeblendet und damit für Berechnungen deaktiviert werden können.
- *Settings*: Diese Arbeitsfläche fasst verschiedene Einstellungen zusammen. Unter anderem können Restriktionen bei der Erkennung von Wänden und Wandöffnungen abgeändert werden. Bei Verwendung der Symbolbibliothek für die Erkennung von Fenster- und Türsymbolen können Begrenzungen beim strukturellen Abgleich der Graphenstrukturen angepasst werden. Zudem wird dem Anwender oder der Anwenderin die Möglichkeit überlassen, Standardwerte für die minimale und maximale Wanddicke sowie für die Fenster- und Türbreite neu zu setzen. Auch wenn diese Intervalle um keine falschen Negative zu erzeugen sehr großzügig gewählt wurden, können durch ein manuelles Eingreifen Sonderfälle behandelt werden. Ebenfalls diesem Kontrollpanel zugefügt wurden vertikale Maßangaben der verschiedenen Gebäudeelemente. Beispielsweise kann die Raumhöhe oder die vertikale Positionierung der Fenster individualisiert werden. Tabelle 5.2 listet die in der Applikation festgelegten Standardparameter auf.
- *Edit IFC objects*: Dieser Abschnitt beinhaltet Interaktionsmöglichkeiten, um einzelne als auch eine Menge markierter Gebäudeelemente für den Export in das IFC-Datenmodell zu bearbeiten. Dies umfasst das Abändern verschiedener Parameter wie etwa Höheninformationen oder das Anfügen einer Objektbeschreibung. Daneben können falsch erkannte Elemente entfernt werden.
- *Single Steps*: Die einzelnen notwendigen Berechnungsschritte für die Erkennung der Gebäudeelemente in einem Grundrissplan sind in diesem Abschnitt aufgelistet und können sequentiell durchgeführt werden. Das Ergebnis der einzelnen Operationen ist damit gut ersichtlich, Komplikationen leicht auffindbar und potentielle manuelle Eingriffe möglich.
- *Automatic*: Die vorhin angeführte sequentielle Durchführung der einzelnen Aktionen wird durch dieses Panel mit einer automatisierten Ausführung aller Operationen ergänzt. Lediglich die Unterscheidung, ob die Symbolbibliothek für die Erkennung der Wandöffnungen miteinbezogen wird oder nur auf den internen Erkennungsprozess zurückgegriffen werden soll, ist vom Anwender oder der Anwenderin zu treffen.

- *Symbol Library*: Dieser Bereich dient der Verwaltung der Symbolbibliothek. Fenster- sowie Türsymbole können der Bibliothek hinzugefügt als auch wieder entfernt werden.

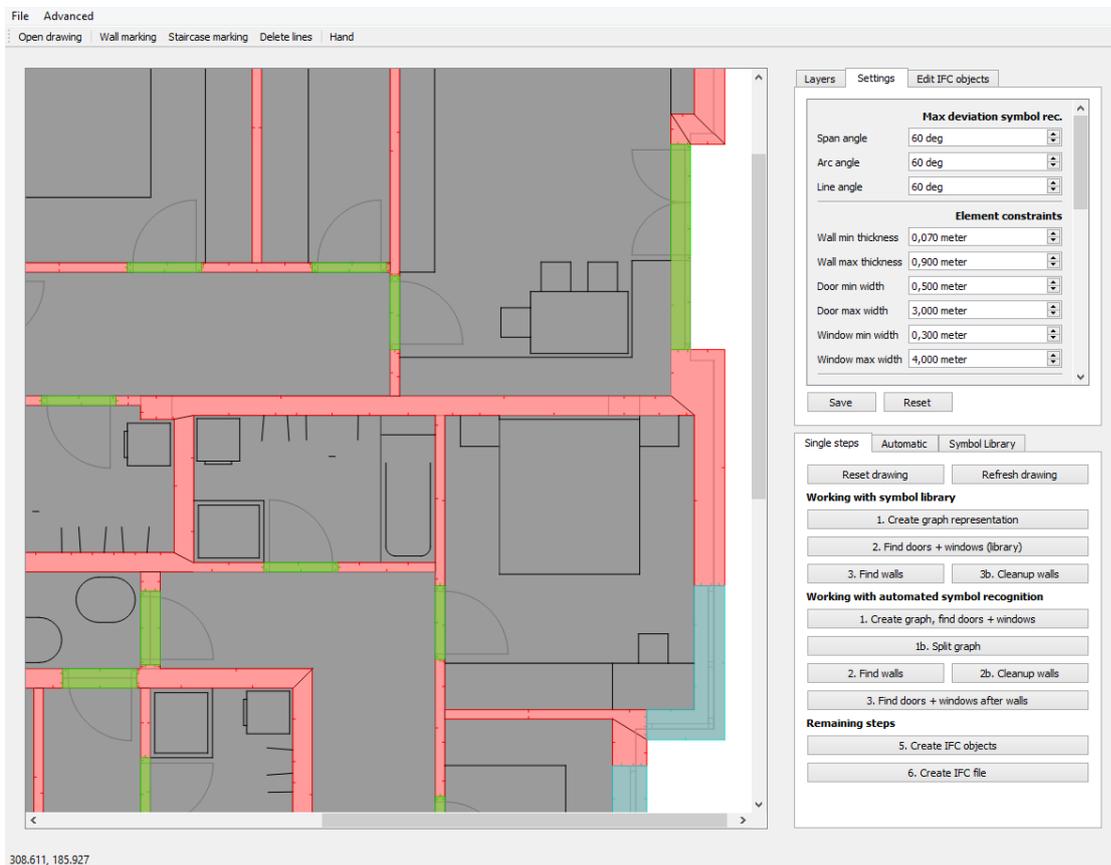


Abbildung 5.21: Grafische Oberfläche der entwickelten Anwendung *CAD2IFC*.

Abschließend wird nun genauer auf die notwendige Interaktion für Kantenmarkierungen eingegangen. Eine solche Markierung von Kanten kann in der grafischen Darstellung der Grundrisszeichnung zu verschiedenen Zeitpunkten erfolgen und ermöglicht das Hinzufügen unterschiedlicher Informationen. Das Auswählen einer Kante ergibt sich durch Positionierung des Mauszeigers (nahezu) auf der jeweiligen Kante, gefolgt von einem linken Mausklick. Der Vorgang der Kantenmarkierung wird durch visuelles Feedback in Form einer Färbung der Kante abgeschlossen. Nachstehend werden die unterschiedlichen Szenarien von Kantenmarkierungen näher betrachtet.

- **Kanten entfernen**: Die Menge an markierten Kanten wird der Graphenstruktur entfernt. Die Markierung einer Kante kann durch einen erneuten Mausklick im Bereich der markierten Kante annulliert werden.

Tabelle 5.2: Standardparameter bei der Symbolerkennung sowie bei dem Erzeugen der dreidimensionalen Gebäudeobjekte.

Symbolerkennung durch Symbolvorlagen	
Winkelabweichung zwischen Kanten	60°
Abweichung des Mittelpunktswinkels bei Kreisbögen	60°
Restriktionen für Wände und Wandöffnungen	
Minimale Wanddicke	7cm
Maximale Wanddicke	90cm
Minimale Türbreite	50cm
Maximale Türbreite	350cm
Minimale Fensterbreite	30cm
Maximale Fensterbreite	400cm
Vertikale Maßangaben für das Extrudieren der Gebäudeelemente	
Wand- oder Raumhöhe	240cm
Türhöhe	200cm
Fensterhöhe	130cm
Höhe Fensterbrüstung	90cm
Boden- und Deckenhöhe	30cm

- **Symbolmarkierung:** Ähnlich zum vorherigen Punkt kann die Markierung einer Kante bei der Erzeugung einer Symbolvorlage mit einem erneuten Mausklick revidiert werden. Während bei der halbautomatischen Markierung eines Symbols lediglich eine Symbolkante markiert werden muss, ist bei der manuellen Markierung das Kennzeichnen aller dem Symbol zugehöriger Kanten erforderlich. Notwendig ist dabei die gesonderte Auswahl von Kanten, welche die jeweiligen Wandangrenzungen definieren. Dies wird durch Drücken der Steuerungstaste während der Kantenmarkierung umgesetzt. Eine unterschiedliche Färbung ermöglicht die visuelle Differenzierung der Kantenfunktionen.
- **Wandmarkierung:** Bei der Markierung einer Wandkante wird die Ausrichtung des zugehörigen Normalvektors zunächst zufällig gesetzt. Ein erneuter Mausklick im Bereich der Kante invertiert die Ausrichtung und ein dritter Mausklick im Bereich der Kante annulliert die Kantenmarkierung.
- **Markierung einer horizontalen Öffnung:** Markierte Kanten müssen dabei ein geschlossenes Polygon erzeugen. Das Entfernen einer Kantenmarkierung erfolgt wiederum durch einen weiteren Mausklick.
- **Visuelles Hervorheben der Kantennachbarn:** Für ein visuelles Feedback über die Nachbarschaft einer Kante werden während dem Mausklick auf eine Kante alle zugehörigen Nachbarkanten farblich hervorgehoben.

5.8 Ablaufdiagramm

Mit dem in Abbildung 5.22 dargestellten Flussdiagramm wird eine grundsätzliche Übersicht des entwickelten Systems geboten. Ablauf als auch die prinzipielle Funktionsweise des entwickelten Systems werden anhand dieses Flussdiagramms im Folgenden kurz veranschaulicht.

Dem Einlesen und Parsen einer vektorbasierten Grundrisszeichnung folgt das Extrahieren und die visuelle Darstellung der jeweiligen Entitäten wie Linie, Polygonzüge und Blockelemente. Der Anwender oder die Anwenderin kann optional Ebenen und damit deren Inhalte ausblenden und für anschließende Operationen deaktivieren. Die jeweiligen ausgelesenen Entitäten der Zeichnung werden anschließend in eine passende Graphenstruktur überführt. Operationen wie das Vereinen von Linienpunkten mit nahezu identischen Koordinaten und das Unterteilen von Linien an Kreuzungspunkten mit anderen Linien schließen die Grapherzeugung ab. Der Anwender oder die Anwenderin hat daraufhin die Möglichkeit, Fehler in der Graphenstruktur, resultierend von Fehlern in der Grundrisszeichnung, durch Entfernen und Hinzufügen von Liniensegmenten zu beheben.

Nach Erzeugung dieser Graphenstruktur folgt die Detektion von Tür- und Fenstersymbolen im Graphen. Neben dem automatischen Erkennen solcher Symbole kann auf eine Symbolbibliothek zurückgegriffen werden. Der automatische Ansatz findet auf Grund häufiger als auch starker Unterschiede der strukturellen Zusammensetzung von Symbolen nur eine bestimmte Teilmenge an Symbolen. Das Arbeiten mit einer Symbolbibliothek, welche durch den Anwender oder der Anwenderin sukzessiv zur Laufzeit erweitert werden kann, ermöglicht einen generischen Ansatz beim Auffinden der Wandöffnungen.

Von aufgefundenen Türen und Fenstern ausgehend werden angrenzende Wandsegmente erkannt und verfolgt. Dieser Vorgang kann mit einem Auffüllen dieser angrenzenden Wandflächen verglichen werden, da laut Definition Wände aus einer geschlossenen Anordnung von Linien bestehen (siehe Abschnitt 4.2 Wände). Je nach Menge und Art von wandinternen Details muss der Anwender oder die Anwenderin in einigen Fällen bestimmte Wandflächen manuell markieren. Abschließend werden durch Verknüpfen aufgefunder Wandelemente und enthaltener Wandöffnungen polygonale Flächen erzeugt, welche die einzelnen Wände repräsentieren. Nach der Wandsuche kann erneut eine automatische Erkennung der Wandöffnungen erfolgen. Da nun Informationen über Wände bereitstehen, können die strukturellen Bedingungen für das Auffinden von Türen und Fenstern gelockert werden.

Raumflächen werden anschließend berechnet und als polygonale Flächen dargestellt. Darauf basierend können zuvor detektierte Wandöffnungen und zugehörige angrenzende Wände, welche nicht Bestandteil einer Raumabgrenzung sind, identifiziert werden. Solche Elemente werden als falsche Positive klassifiziert und entfernt. Die Gebäudekontur wird auf Basis von Wand- und Rauminformationen erzeugt und dient für die Erstellung des Fußbodens als auch der Gebäudedecke.

Als letzte Bestandteile des Gebäudemodells werden Balkone automatisch detektiert und

horizontale Öffnungen wie Treppenhäuser können manuell hinzugefügt werden. Bevor abschließend der Export der erzeugten Gebäudebestandteile mittels dem IFC-Datenmodell erfolgt, können diese zuvor noch individuell modifiziert werden. Unter anderem umfasst dies das Anpassen von Höheninformationen, welche aus Grundrissplänen nicht auslesbar sind.

5.9 Anforderungen an Grundrisspläne

Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung und Beschreibung von Anforderungen an Pläne, welche für eine korrekte Erkennung der enthaltenen Gebäudeelemente erforderlich sind. Diese Anforderungen resultieren aus den entworfenen Methoden und wurden während der Systemumsetzung im Zuge von Überprüfungen durch verschiedene Grundrisspläne definiert:

- *Dateiformat*: Grundrisspläne müssen im DXF-Format oder DWG-Format vorliegen, um für die Generierung der 3D-Modelle herangezogen werden zu können. Unterstützt werden gerade Liniensegmente sowie Kreisbögen. Symbole oder Wandformen mit beliebigen Kurvensegmenten können daher nicht vollständig aufgefunden werden.
- *Zeichenfehler*: Auch wenn Zeichenfehler in einigen Fällen automatisch behoben werden und nicht immer zu falschen oder abweichenden Ergebnissen führen, sollte auf eine fehlerfreie Darstellung des Grundrissplans geachtet werden. Vor allem ungewollte und größere Abstände zwischen benachbarten Liniensegmenten sind häufige Ursachen nicht erkannter Zeichenfehler. Auswirkung von Zeichenfehlern sind primär nicht auffindbare Fenster- und Türsymbole oder falsch detektierte Wandsegmente.
- *Erkennen von Wandöffnungen*: Die automatische Methode der Symbolerkennung beschränkt sich auf eine Teilmenge an häufig in Grundrissplänen eingesetzten Symbolen. Zusätzliche Symbole können mit dem halbautomatischen Ansatz unter Verwendung von Symbolvorlagen aufgefunden werden. Voraussetzung dabei ist eine direkte Anknüpfung der Symbole an die benachbarten Wände als auch eine zusammenhängende Symbolvorlage.
- *Erkennung von Wänden*: Primäre Ursache für eine nicht vollständige automatische Erkennung der Wandflächen sind wandinterne Details wie Abtrennungen oder eingezeichnete Wandschichten. Abhängig von der strukturellen Zusammensetzung solcher wandinternen Details und der Menge an aufgefundenen Wandöffnungen können Wände teilweise als auch zur Gänze nicht erfasst werden. Zudem werden freistehende Wände ohne vorhandenen Wandöffnungen nicht automatisch aufgefunden. In diesen Situationen muss auf den halbautomatischen Ansatz der Wanddetektion zurückgegriffen werden.

- *Erkennung von Räumen und Gebäudekonturen:* Eine unvollständige Erkennung von Wänden sowie enthaltener Wandöffnungen kann in einer unvollständigen Gebäudekontur resultieren. Auch die Raumerkennung kann dadurch beeinflusst werden. So kann beispielsweise nicht zwischen zwei benachbarte Räume differenziert werden, falls die Erkennung einer Verbindungstür fehlschlug. Des Weiteren sind Räume von Innenhöfen nicht immer eindeutig unterscheidbar und dies erfordert in solchen Fällen einen manuellen Eingriff.
- *Horizontale Öffnungen:* Treppenhäuser, Aufzugschächte sowie andere vertikale Verbindungen zwischen Stockwerken müssen manuell eingezeichnet werden. Räume ohne Türöffnungen setzen einen solchen manuellen Eingriff voraus, um korrekt als Raumfläche klassifiziert zu werden.

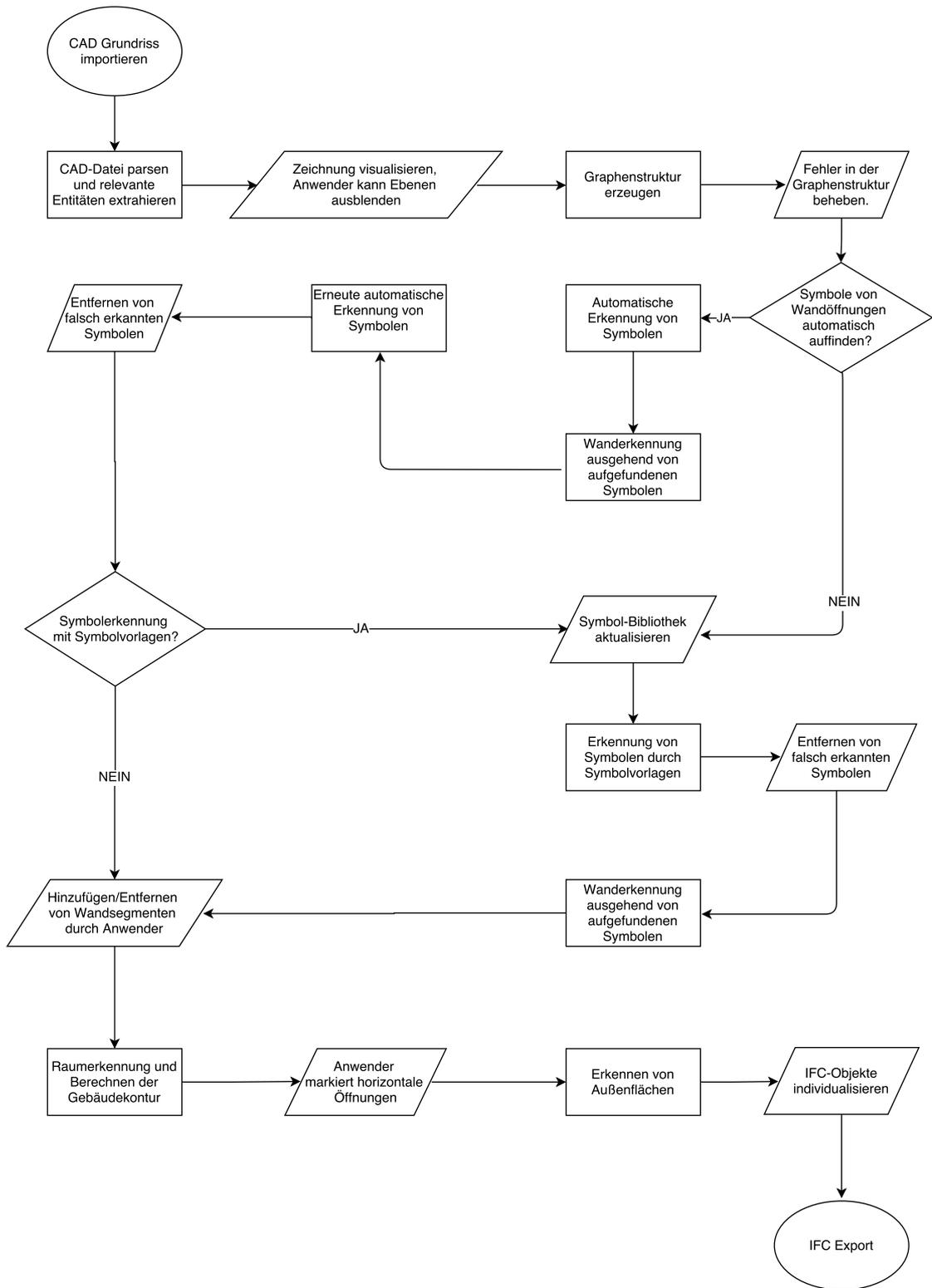


Abbildung 5.22: Programmablaufplan des entwickelten Systems *CAD2IFC*.

Evaluierung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der durchgeführten Evaluierung des Systems und der entwickelten Methoden. Zunächst erfolgt in Abschnitt 6.1 Studiendesign eine Beschreibung des Testverfahrens. Grundlage ist die Überprüfung des Systems anhand von Testplänen, welche im nächsten Abschnitt 6.2 Beschreibung der Testpläne näher behandelt werden. Insgesamt wurden neun Testpläne von drei verschiedenen Architekten untersucht. Ergebnisse der durchgeführten Evaluierung werden im Abschnitt 6.3 Diskussion der Resultate angeführt. Quantitative Werte geben dabei Auskunft über die Effektivität der Applikation sowie Effizienz hinsichtlich der Art und Menge an notwendigen Interaktionen durch den Anwender oder der Anwenderin. Des Weiteren werden die Evaluierungsergebnisse herangezogen, um nennenswerte und interessante Sachverhalte sowie Stärken und Schwächen der entwickelten Methoden aufzuzeigen.

Ein Vergleich der entwickelten Applikation mit anderen Systemen wurde nicht durchgeführt. Begründet wird dies mit der Tatsache, dass Systeme, wie in Abschnitt 3.2 Generierung von 3D-Modellen aus CAD-Grundrissplänen beschrieben, unterschiedliche Bedingungen und Voraussetzungen an Grundrisspläne stellen und einen abweichenden Funktionsumfang aufweisen. Zusätzlich umfassen die meisten dieser untersuchten Arbeiten eine unzureichende Evaluierung des vorgestellten Systems, wodurch ein aussagekräftiger Vergleich erschwert wird. Daneben ist der Großteil der aufgefundenen wissenschaftlichen Systeme öffentlich nicht verfügbar. Kommerzielle Anwendungen mit vergleichbaren Funktionen waren dem Autor zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit nicht bekannt.

6.1 Studiendesign

Im Zuge der Evaluierung wurden drei Personen mit Erfahrung im Zeichnen von CAD-Plänen beauftragt jeweils drei Grundrisspläne zu erstellen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Evaluierung dadurch vom eigentlichen Einsatz der Anwendung abweicht. Grundrisspläne sind dabei nicht explizit zu erstellen, sondern die Modellgenerierung von bereits

existierenden CAD-Plänen ist die primäre Zielsetzung. Hinsichtlich der Evaluierung haben eigens gezeichnete Pläne jedoch den Vorteil unterschiedliche Zeichenstile zu prüfen und dabei Rahmenbedingungen an Inhalt sowie Aufbau der Pläne stellen zu können. Der zu zeichnende Grundriss soll sich an Größe und Struktur einer herkömmlichen Wohnung orientieren. Wandöffnungen sollen zudem durch verschiedene Tür- und Fenstersymbole dargestellt werden, um eine umfangreiche Symbolvielfalt sicherzustellen. Für eine erhöhte Komplexität der Pläne sind jedem Raum dekorative Elemente hinzuzufügen. Alles Weitere wurde den Personen freigestellt, unter anderem die zu verwendende CAD-Applikation zum Zeichnen der Pläne. Wichtig ist hierbei lediglich eine durchführbare Konvertierung in das Dateiformat DWG oder DXF.

Die insgesamt neun Grundrisszeichnungen wurden daraufhin für die 3D-Modellerzeugung durch die entwickelte Anwendung herangezogen. Neben der vollständigen Modellgenerierung wird insbesondere die Art und Menge an notwendigen Interaktionen durch den Anwender oder der Anwenderin geprüft. Dafür werden Symbole von Wandöffnungen zunächst automatisch detektiert. Verbleibende, nicht automatisch erkannte Symbole werden daraufhin für die halbautomatische Erkennung durch die Symbol-Bibliothek herangezogen, indem die jeweiligen Symbolvorlagen angefertigt werden. Erzeugt die Symboldetektion falsche Positive, werden diese entfernt und als manueller Eingriff vermerkt. Die Detektion der Wandflächen erfolgt anschließend analog zur Erkennung der Wandöffnungen. Der automatischen Detektion folgt bei unvollständigem Ergebnis die halbautomatische Erkennung der Wände basierend auf Kantenmarkierungen durch den Anwender oder der Anwenderin. Räume und Außenflächen wie Balkone werden automatisch detektiert und potentielle, manuell durchgeführte Korrekturen schließen die Modellgenerierung ab. Die verschiedenen einstellbaren Parameter der Applikation wurden während des Testverfahrens nicht abgeändert und orientieren sich an die in Tabelle 5.2 vorkommenden Standardwerte.

Die Erzeugung von Referenzwerten für die Berechnung quantitativer Ergebnisse erfolgt trivial durch Aufsummieren der jeweiligen Gebäudebestandteile (Türen, Fenster, Räume, Balkone). Bei der Wanddetektion wurde für eine ausschlaggebendere Aussage die Relation zwischen aufgefundenen Wandflächen und Wandflächen eines angefertigten Referenzmodells herangezogen. Die Wandsegmente im Bereich der Wandöffnungen fließen für diese Flächenberechnungen mit ein. Die Erzeugung der Referenzmodelle erfolgte halbautomatisch mit der entwickelten Applikation und beinhaltet für einige Testpläne Modifikationen der CAD-Dateien. Flächenrelationen wurden mit Hilfe des IFC-Betrachtungsprogrammes *BIM Vision* berechnet.

6.2 Beschreibung der Testpläne

Die insgesamt neun untersuchten Testpläne sind mit zugehöriger Visualisierung des Erkennungsergebnisses im Anhang A dieser Arbeit angefügt. Die Grundrisspläne A.1 A.2 A.3 von Person *A* wurden in AutoCAD, die Pläne A.4 A.5 A.6 von Person *B* und A.7 A.8 A.9 von Person *C* in ArchiCAD gezeichnet. Alle drei Personen haben sich an

die vorgegebenen Bedingungen gehalten und Grundrisse von Wohnungen gezeichnet. Die Wohnungen weisen einen Umfang von fünf bis zehn Räumen auf, nahezu jeder ausgestattet mit diversen Einrichtungsgegenständen (Ausnahmen bilden Korridore und kleine Räumlichkeiten). Der Grundriss mit den wenigsten Wandöffnungen umfasst sieben Fenster und sieben Türen, jener mit den meisten Wandöffnungen beinhaltet dreizehn Fenster und zwölf Türen.

Abschließend werden einige Besonderheiten der erhaltenen Testpläne aufgezeigt:

- Als einziger Grundriss beinhaltet Testplan A.2 von Person *A* detaillierte Informationen über Wandschichten.
- Testplan A.3 von Person *A* weist einen Innenhof auf.
- Plan A.5 und A.6 von Person *B* beinhalten jeweils ein nicht zusammenhängendes Türsymbol und können mit der entwickelten Applikation nicht erfasst werden.
- Die Wohnung in Plan A.6 von Person *B* besteht aus zwei Geschossen.
- Die in Plan A.8 von Person *C* dargestellte Wohnung weist als einzige eine geschwungene Wand auf.
- In allen neun Plänen verfügen vorkommende Wandsegmente über eine gleichbleibende Dicke.
- Sieben Pläne besitzen Außenflächen in Form von ein oder mehreren Balkonen (beziehungsweise Terrassen).
- Vier Pläne beinhalten Treppenhäuser.

6.3 Diskussion der Resultate

In diesem Abschnitt werden nun die Resultate der untersuchten Testpläne präsentiert und diskutiert. In den Unterabschnitten 6.3.1 Erkennung der Wandöffnungen, 6.3.2 Erkennung der Wandflächen und 6.3.3 Erkennung der Räume und Außenflächen werden Ergebnisse der automatischen sowie halbautomatischen Erkennung von Gebäudebestandteilen behandelt. Die dafür notwendigen Interaktionen durch den Benutzer werden in Unterabschnitt 6.3.4 Notwendige Benutzerinteraktionen angeführt und Unterabschnitt 6.3.5 Generierung der Symbolvorlagen beinhaltet Resultate der halbautomatischen Erzeugung von Symbolvorlagen.

6.3.1 Erkennung der Wandöffnungen

Tabelle 6.1 zeigt zunächst quantitative Ergebnisse der automatischen Erkennung von Wandöffnungen. Neben der Menge an korrekt detektierten Fenster- und Türsymbolen ist ergänzend die Anzahl an falschen Positiven angegeben, welche durch den Anwender oder

Tabelle 6.1: Ergebnisse der automatischen Symbolerkennung von Wandöffnungen.

Grundriss	Anzahl Symbole		Automatische Erkennung			
	Fenster	Türen	Fenster	Türen	Falsche Positive	
					Fenster	Türen
Person A A.1	10	8	10	8	0	0
Person A A.2	5	10	0	9	0	2
Person A A.3	11	7	11	7	0	0
Person B A.4	13	12	12	9	0	1
Person B A.5	14	10	14	7	0	1
Person B A.6	7	7	6	4	0	1
Person C A.7	8	16	8	16	0	3
Person C A.8	13	12	13	12	1	1
Person C A.9	10	9	10	9	1	3

der Anwenderin für eine korrekte Modellgenerierung entfernt werden müssen. Ergänzend kann in Tabelle 6.2 für alle Pläne die Genauigkeit (Precision) sowie die Trefferquote (Recall) der automatischen Symbolerkennung abgelesen werden. Die durchschnittliche Genauigkeit dieser automatischen Symbolerkennung von Fenstern und Türen beträgt 0.93 und die durchschnittliche Trefferquote liegt bei 0.87 . Verbleibende, im Grundriss noch aufzufindende Symbole werden anschließend durch bereitgestellte Symbolvorlagen detektiert. Tabelle 6.3 verdeutlicht das Resultat dieses Vorgangs. Wie bei der automatischen Erkennung wird die Anzahl an korrekt erkannten Symbolen sowie die Anzahl an falschen Positiven aufgelistet. Zusätzlich lässt sich ablesen, ob die zu erstellenden Symbolvorlagen mit dem halbautomatischen Ansatz durch Markieren einer einzigen Kante erzeugt werden konnten, oder hingegen eine vollständige manuelle Markierung der Vorlage notwendig war. Die Symbolbibliothek wurde für jeden der untersuchten Pläne zurückgesetzt und neu erstellt.

Ergebnisse der automatischen als auch halbautomatischen Symbolerkennung werden nun im Folgenden genauer betrachtet und diskutiert. Zunächst konnte festgestellt werden, dass sich die strukturelle Zusammensetzung der jeweiligen Testpläne an den in Kapitel 4 Analyse von Grundrissplänen aufgefundenen Charakteristiken orientiert. Symbole von Wandöffnungen grenzen dabei immer an die benachbarten Wände an und können bis auf zwei Ausnahmen durch eine einzelne Zusammenhangskomponente dargestellt werden. Jeweils eine Schiebetür in Testplan A.5 und Testplan A.6 von Person B besteht aus zwei getrennten Komponenten. Das automatische Auffinden von häufig in Grundrissplänen vorkommenden Wandöffnungen bestätigt sich durch eine durchschnittliche Erkennungsrate von 92.3% der Fenstersymbole sowie 89.0% der Türsymbole in den insgesamt neun untersuchten Testplänen. Der automatische Ansatz der Symbolerkennung führt jedoch

Tabelle 6.2: Genauigkeit und Trefferquote der automatischen Symbolerkennung von Wandöffnungen.

Grundriss	Genauigkeit (Precision)		Trefferquote (Recall)	
	Fenster	Türen	Fenster	Türen
Person A A.1	1	1	1	1
Person A A.2	1	0.82	0	0.9
Person A A.3	1	1	1	1
Person B A.4	1	0.9	0.92	0.75
Person B A.5	1	0.87	1	0.7
Person B A.6	1	0.8	0.86	0.57
Person C A.7	1	0.84	1	1
Person C A.8	0.93	0.92	1	1
Person C A.9	0.91	0.75	1	1

Tabelle 6.3: Ergebnisse der halbautomatischen Symbolerkennung von Wandöffnungen durch Bereitstellen von Symbolvorlagen.

Grundriss	Verbleibende Symbole		Markierung der Vorlage			Erkennung mittels Symbolvorlagen			
	Fenster	Türen	halbautomatisch	manuell	nicht möglich	Fenster	Türen	Falsche Positive	
								Fenster	Türen
Person A A.1	0	0	x	x	x	x	x	x	x
Person A A.2	5	1	2	1	0	5	1	0	0
Person A A.3	0	0	x	x	x	x	x	x	x
Person B A.4	1	3	3	1	0	1	3	0	0
Person B A.5	0	3	1	0	1	x	2	x	0
Person B A.6	1	3	1	1	1	1	2	0	0
Person C A.7	0	0	x	x	x	x	x	x	x
Person C A.8	0	0	x	x	x	x	x	x	x
Person C A.9	0	0	x	x	x	x	x	x	x

bei sieben Testplänen zu einigen falschen Positiven, welche durch den Anwender oder der Anwenderin manuell entfernt werden müssen. Während bei lediglich zwei Testplänen falsche Fensteröffnungen detektiert wurden, sind falsche Türöffnungen in sieben Testplänen vorhanden. Großteil dieser falsch erkannten Wandöffnungen entspringt den dekorativen Inhalten der Grundrisspläne. Die hohe Anzahl falsch aufgefundener Türsymbole (in Relation zu falsch aufgefundenen Fenstern) ist vor allem damit begründet, dass nach Wandöffnungen ohne eingezeichnetem Türsymbol gesucht wird.

Die verbleibenden, automatisch nicht erkannten Symbole sind nach Erzeugung der zugehörigen Symbolvorlagen auffindbar. Ausnahmen bilden die zwei zuvor angesprochenen Schiebetüren, welche auf Grund ihrer unverbundenen Struktur nicht in die Symbolbibliothek aufgenommen werden konnten. 70% der Symbolvorlagen konnten durch Markieren einer einzigen Kante korrekt erstellt werden. Die Markierung von den restlichen 30%

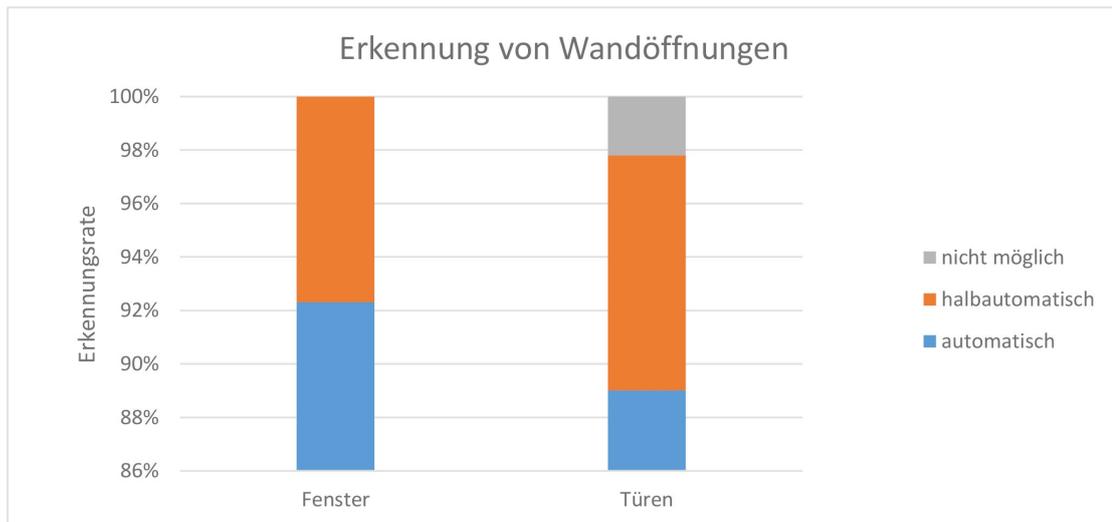


Abbildung 6.1: Durchschnittliche Erkennungsrate der automatischen sowie der ergänzenden, halbautomatischen Detektion von Fenster- und Türsymbolen.

der Vorlagen musste jeweils vollständig manuell durchgeführt werden. Das Auffinden der erstellten Symbolvorlagen hatte keine falschen Positive als Ergebnis und alle entsprechenden Wandöffnungen konnten lokalisiert werden. Umfassendere Ergebnisse der Generierung von Symbolvorlagen werden in Unterabschnitt 6.3.5 Generierung der Symbolvorlagen präsentiert.

Alle neun Testpläne zusammengefasst, wird in Abbildung 6.1 die durchschnittliche Erkennungsrate von Fenster- und Türsymbolen visualisiert. Neben der Erkennungsrate der automatischen Detektion (92.3% der Fenster und 89.0% der Türen) kann abgelesen werden, welche Verbesserung die ergänzende, halbautomatische Detektion mit sich bringt (Erkennen von zusätzlichen 7.7% der Fenster und 8.8% der Türen). Insgesamt konnten alle Fenster- und Türsymbole detektiert werden, mit Ausnahme der beiden nicht zusammenhängenden Türsymbole.

Die Verwendung einer umfangreichen Symbolbibliothek kann den manuellen Aufwand stark verringern. Einerseits muss ein Symbol nur einmalig markiert und der Symbolbibliothek hinzugefügt werden. Daneben könnte die Symbolbibliothek in vielen Fällen die automatische Detektierung der Wandöffnungen ablösen, was eine Verringerung falscher Positive mit sich bringt. Dennoch sei angemerkt, dass gerade Vorlagen sehr einfach strukturierter Symbole mit einer hohen Wahrscheinlichkeit falsche Positive generieren. So ist etwa das Symbol der Innentüren bei Testplan A.3 von Person A nur bedingt als Symbolvorlage geeignet, da sich dieses Symbol neben den Kanten der Wandabgrenzung nur aus einer einzigen geraden Linie zusammensetzt.

Tabelle 6.4: Ergebnisse der automatischen und halbautomatischen Wanddetektion.

Grundriss	Erkennung Wandflächen		
	automatisch	manuell	
	Wandfläche in %	Wandfläche in %	Markierungen
Person A A.1	100	x	x
Person A A.2	100	x	x
Person A A.3	100	x	x
Person B A.4	100	x	x
Person B A.5	98.9	x	x
Person B A.6	98.6	98.8	1
Person C A.7	96.5	100	3
Person C A.8	99.3	100	1
Person C A.9	100	x	x

6.3.2 Erkennung der Wandflächen

In Tabelle 6.4 sind quantitative Ergebnisse der Wanddetektion dargestellt. Dabei wird wiederum zwischen automatischer und halbautomatischer Vorgehensweise differenziert. Erfolgt mit dem automatischen Ansatz keine vollständige Erkennung der Wandflächen, wird der halbautomatische Ansatz für die verbleibenden Wandsegmente herangezogen und die Anzahl an notwendigen Kantenmarkierungen festgehalten. Aufgefundene Wandflächen werden in Relation zur gesamten vorhandenen Wandfläche im jeweiligen Referenzmodell angegeben. Ergänzend kann in Tabelle 6.5 für alle Pläne die Genauigkeit (Precision) sowie die Trefferquote (Recall) der automatischen Wanddetektion abgelesen werden. Die durchschnittliche Genauigkeit dieser automatischen Wanderkennung beträgt 1.0 und die durchschnittliche Trefferquote liegt bei 0.99 .

Begründet durch die hohe Erkennungsrate von Wandöffnungen konnten in den Testplänen nahezu alle Wandflächen automatisiert aufgefunden werden. Testplan A.7 von Person *C* erforderte zwei und Testplan A.9 von Person *C* eine manuelle Kantenmarkierung für eine hundertprozentige Erkennungsrate der Wände. Die Ursache dafür stellen wandinterne Unterteilungen dar. Bei Testplan A.5 sowie Testplan A.6 von Person *B* konnte eine hundertprozentige Erkennungsrate auf Grund der fehlenden Wandflächen im Bereich der beiden nicht erfassten Schiebetüren nicht erreicht werden. Zudem musste in Testplan A.6 dieser Person auf Grund eines Zeichenfehlers eine Wandkante manuell markiert werden. Ein Möbelstück überlappte sich dabei mit der angrenzenden Wand. Neben der Möglichkeit beliebige Wandformen zu erkennen, ist im Zusammenhang mit der Wanderkennung insbesondere Testplan A.2 von Person *A* interessant. Vor allem Außenwände weisen bei diesem Grundriss eingezeichnete Wandschichten auf. Dennoch konnte die gesamte Wandfläche des Gebäudes korrekt und ohne zusätzliche Interaktionen des Anwenders oder der Anwenderin erfasst werden.

Tabelle 6.5: Genauigkeit und Trefferquote der automatischen Wanderkennung.

Grundriss	Genauigkeit (Precision)	Trefferquote (Recall)
Person A A.1	1	1
Person A A.2	1	1
Person A A.3	1	1
Person B A.4	1	1
Person B A.5	1	0.99
Person B A.6	1	0.99
Person C A.7	1	0.96
Person C A.8	1	0.99
Person C A.9	1	1



Abbildung 6.2: Durchschnittliche Erkennungsrate der automatischen sowie der ergänzenden, halbautomatischen Detektion von Wandflächen.

Alle neun Testpläne zusammengefasst, wird abschließend in Abbildung 6.2 die durchschnittliche Erkennungsrate der Wanddetektion visualisiert. Neben der durchschnittlichen Erkennungsrate der automatischen Erkennung (99.3% der Wandflächen) kann abgelesen werden, welche Verbesserung die ergänzende, halbautomatische Erkennung mit sich bringt (Erkennen von zusätzlichen 0.3% der Wandflächen). Die Kombination der automatischen und halbautomatischen Wanderkennung ermöglichte eine vollständige Erfassung aller Wände (ausgenommen der Wandbereich der zwei nicht zusammenhängenden Türsymbole).

Tabelle 6.6: Ergebnisse der automatischen Erkennung von Räumen und Außenflächen (Balkone und Terrassen).

Grundriss	Anzahl		Erkennung	
	Räume	Balkone, Terrassen	Räume	Balkone, Terrassen
Person A A.1	8	1	8	1
Person A A.2	8	1	8	1
Person A A.3	7	0	7	0
Person B A.4	9	1	9	1
Person B A.5	5	1	4	1
Person B A.6	6	1	5	1
Person C A.7	10	4	10	4
Person C A.8	6	0	6	0
Person C A.9	8	1	8	1

6.3.3 Erkennung der Räume und Außenflächen

In Tabelle 6.6 sind quantitative Ergebnisse der automatischen Erkennung von Räumen und Außenflächen (Balkone und Terrassen) dargestellt. Falsche Positive sind weder bei der Detektion von Räumen, noch bei der Detektion der Außenfläche aufgetreten. Damit ist eine durchschnittliche Genauigkeit (Precision) von 1.0 gegeben.

Die implementierte Methode für das Auffinden der Räume sowie der Gebäudekontur lieferte insgesamt zufriedenstellende Ergebnisse. Aufgrund der nicht erkannten Schiebetür in Testplan A.5 und Testplan A.6 von Person *B* konnten jeweils zwei benachbarte Räume nicht voneinander unterschieden werden und wurden deshalb als zusammengehörige Raumfläche aufgefasst. Alle weiteren Räumlichkeiten wurden automatisch detektiert, womit die durchschnittliche Trefferquote (recall) mit 0.96 gegeben ist. Die Gebäudekontur wurde in allen Testplänen korrekt erkannt, wobei jedoch der Innenhof in Testplan A.3 von Person *A* als solcher manuell markiert werden musste. Ohne diesen manuellen Eingriff wird der Innenhof als Raumfläche aufgefasst und die innere Gebäudekontur kann nicht erzeugt werden. Testplan A.6 von Person *B* umfasst ein zweistöckiges Gebäude, dessen Konturen ebenfalls korrekt erzeugt wurden. Die abschließende Berechnung von Außenflächen lokalisierte vorhandene Balkone und Terrassen vollständig und korrekt. Damit ist eine durchschnittliche Genauigkeit von 1.0 und eine durchschnittliche Trefferquote von 1.0 gegeben.

Alle neun Testpläne zusammengefasst, wird abschließend in Abbildung 6.3 die durchschnittliche Erkennungsrate der automatischen Detektion von Räumen und Außenflächen (Balkone und Terrassen) visualisiert.

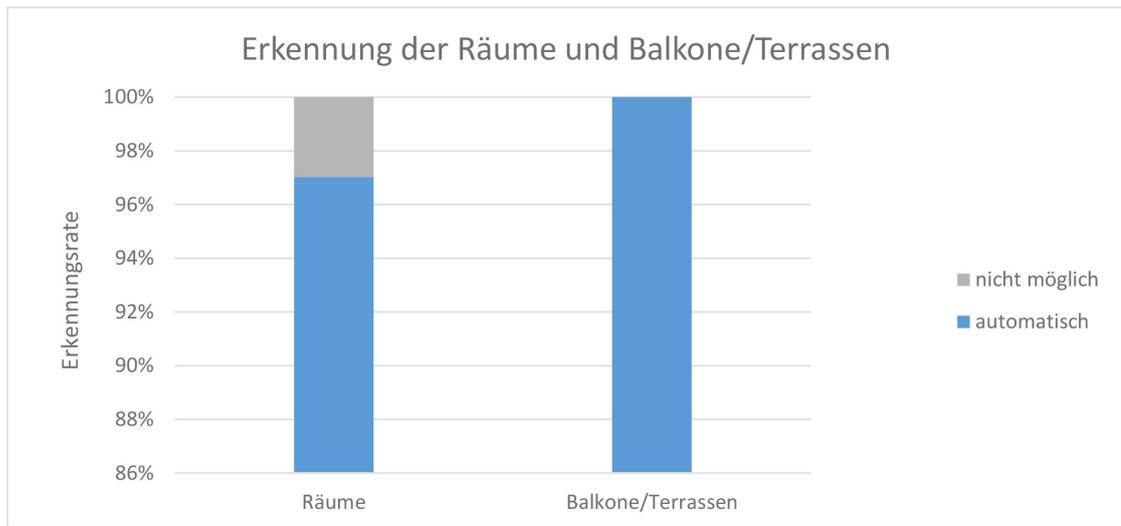


Abbildung 6.3: Durchschnittliche Erkennungsrate der automatischen Detektion von Räumen und Außenflächen (Balkone und Terrassen).

6.3.4 Notwendige Benutzerinteraktionen

In den vorherigen Unterabschnitten 6.3.1 Erkennung der Wandöffnungen, 6.3.2 Erkennung der Wandflächen und 6.3.3 Erkennung der Räume und Außenflächen wurde der Erkennungsprozess für die verschiedenen Gebäudebestandteile genauer untersucht. Während die Erkennungsrate dieser in Grundrissen vorkommenden Objekten ein ausschlaggebendes Kriterium für die Effektivität des entwickelten Systems repräsentiert, stellt die Menge an notwendigen Interaktionen durch den Benutzer oder der Benutzerin ein Maß für die Effizienz des Systems dar. Manuelle Eingriffe durch den Benutzer oder die Benutzerin verbessern die Adaption an die in den verschiedenen Plänen vorherrschenden Bedingungen und ermöglichen Fehler bei der automatischen Analyse zu beheben. Abbildung 6.4 visualisiert die notwendigen Benutzerinteraktionen für die jeweiligen Testpläne. Differenziert wird dabei zwischen dem Entfernen falscher Positive bei der Erkennung von Wandöffnungen, dem Erstellen von Symbolvorlagen und dem Vervollständigen von Wandflächen. Wie der Abbildung zu entnehmen, konnten zwei der insgesamt neun Testpläne ohne manuelle Eingriffe analysiert werden. In diesen beiden Fällen ist die Generierung der 3D-Modelle somit zu 100% vollautomatisch durchführbar gewesen. Ergänzend gibt Abbildung 6.5 die durchschnittliche Anzahl an notwendigen Benutzerinteraktionen wieder (insgesamt drei bis vier Eingriffe pro Grundrisszeichnung).

6.3.5 Generierung der Symbolvorlagen

Alle neun Testpläne zusammengefasst, sind insgesamt 21 verschiedene Türsymbole und neun verschiedene Fenstersymbole vorhanden. Zwei Symbole gelten dann als unterschiedlich, wenn sich die Anzahl an vorkommenden Kanten oder die Anordnung der

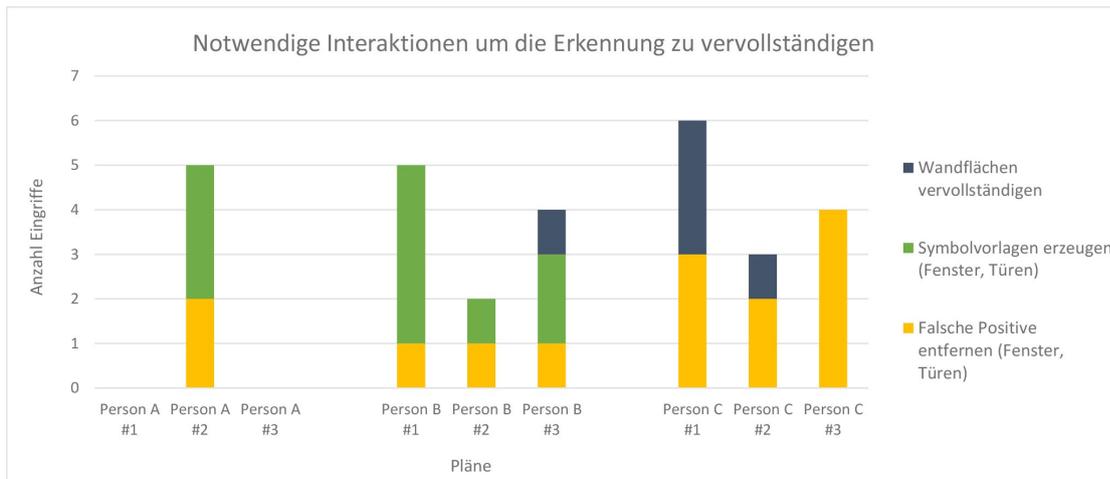


Abbildung 6.4: Verschiedene Benutzerinteraktionen, welche für die jeweiligen, resultierenden 3D-Gebäudemodelle notwendig waren.

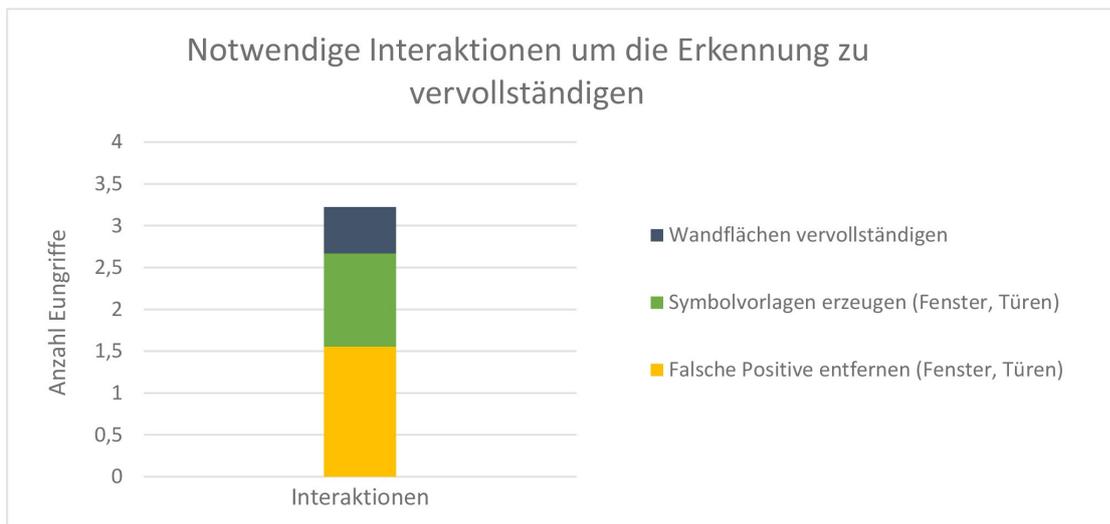


Abbildung 6.5: Durchschnittliche Anzahl an Benutzerinteraktionen, welche für die Generierung des 3D-Gebäudemodelles aus einem eingelesenen Testplan notwendig waren.

Kantennachbarn unterscheiden. Für eine geeigneteren Evaluierung der halbautomatischen Generierung von Symbolvorlagen (siehe Unterabschnitt 5.3.2 Halbautomatische Erkennung mittels Symbolvorlagen) wurden diese Fenster- und Türsymbole herangezogen. Abbildung 6.6 verdeutlicht die Effektivität des entwickelten Algorithmus, mit welchem Symbolvorlagen durch Markieren einer einzigen Symbolkante generiert werden können. Für alle Symbole konnte die Symbolvorlage entweder halbautomatisch (durch Markieren einer Symbolkante) oder manuell (durch Markieren aller Symbolkanten) generiert werden. Ausnahme stellen die zwei nicht zusammenhängenden Türsymbole dar (siehe vorherigen

Unterabschnitt 6.3.1 Erkennung der Wandöffnungen). Insgesamt konnten 73% aller vorkommenden Symbole für die halbautomatische Generierung der Vorlagen herangezogen werden.

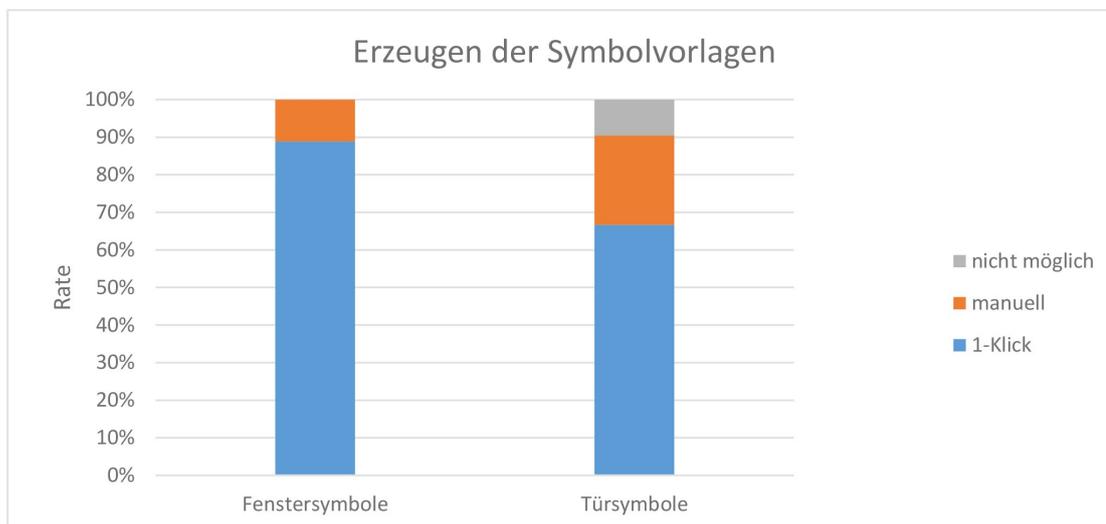


Abbildung 6.6: Resultat der halbautomatischen sowie manuellen Generierung von Symbolvorlagen. Die halbautomatische Generierung einer Vorlage erwartet die Markierung einer Symbolkante durch den Anwender oder Anwenderin. Bei der manuellen Erzeugung müssen alle Symbolkanten durch den Anwender oder die Anwenderin markiert werden.

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Erweiterungen und zukünftige Verbesserungen

Neben Verbesserungen der entwickelten Methoden werden in diesem Abschnitt mögliche Erweiterungen der Applikation aufgelistet und beschrieben.

Verbesserungen

- *Performance*: Umfangreiche Pläne als auch die Verwendung großer Symbolbibliotheken verlangen eine effizientere Implementierung der Methoden, um einen schnellen Erkennungsprozess mit einer zeitlichen Dauer von wenigen Minuten sicherzustellen.
- *Symbolerkennung*: Der Übergang von Wandöffnungen zu den angrenzenden Wänden muss näher untersucht werden. Gerade Türsymbole erschweren in einigen Fällen die eindeutige Berechnung des Wandverlaufs und der Wanddicke im Bereich des Symbols.
- *Minimierung manueller Eingriffe*: Insbesondere die automatische Symbolerkennung von Wandöffnungen als auch die automatische Wanddetektion verlangen ergänzende Methoden für eine weitere Minimierung oder die komplette Ablösung manueller Eingriffe.

Erweiterungen

- *Mehrstöckige Gebäude*: Automatische Verknüpfung der analysierten Stockwerke zu einem einzigen Modell des Gebäudes.
- *Automatische Erkennung der Treppenhäuser*: Neben Auffinden und Lokalisieren von Treppenhäusern in Grundrissplänen beinhaltet dies unter anderem die Analyse

der strukturellen Zusammensetzung dieser vertikalen Verbindungselemente für das Erfassen grundlegender Charakteristiken.

- *Detaillierte Fenster und Türen:* Für exaktere 3D-Gebäudemodelle müssen unter anderem zusätzliche semantische Informationen der Wandöffnungen erfasst werden. Dies kann beispielsweise die automatische Erkennung der Türausrichtung oder die genaue Fensterstruktur beinhalten.

7.2 Zusammenfassung

Zweck dieser Arbeit war die Entwicklung eines Software-Systems für die automatisierte Generierung dreidimensionaler Gebäudemodelle aus Grundrissplänen im Vektorformat. Anwendungsmöglichkeit einer solchen Konvertierung liegt dabei insbesondere im Bereich der virtuellen Realität. Ein virtuelles Durchwandern der im Grundrissplan gezeichneten Räumlichkeiten ist damit auf eine effiziente und kostengünstige Weise möglich.

Beginnend bei der Literaturrecherche zu dieser Thematik verschärfte sich die Behauptung, dass ein umfassendes und vollautomatisches System für die Generierung von 3D-Modellen aus beliebigen Grundrissplänen zu diesem Zeitpunkt nicht existiert. Begründet wird dies insbesondere mit dem Mangel eines allgemein gültigen Zeichenstandards und damit die nicht eindeutig interpretierbare Struktur von Grundrissplänen. Untersuchte Arbeiten setzen meist eine bestimmte Struktur der Pläne voraus, wodurch der Einsatzbereich des Systems stark eingeschränkt wird. Beispielsweise erkennen Systeme aller untersuchten Arbeiten nur Wände mit gleichbleibender Wanddicke. Hauptmerkmal der entwickelten Applikation liegt in der Reduzierung solcher Bedingungen in Kombination mit einer möglichst automatisierten Durchführung. Die Detektion der Symbole von Wandöffnungen wird dabei automatisiert durch strukturelles Vorwissen durchgeführt und mit einem halbautomatischen Ansatz generisch erweitert. Dem Anwender oder der Anwenderin wird damit die Möglichkeit geboten, spezielle als auch komplexe Symbole, mit minimalem Aufwand einer Symbolbibliothek hinzuzufügen und die zukünftige automatische Erkennung auszubauen. Ausgehend von den erkannten Wandöffnungen lassen sich angrenzende Wandflächen automatisiert auffinden. Dieser Vorgang beruht auf eine direkte Anknüpfung der Wandöffnungen an benachbarten Wänden. Dieses strukturelle Merkmal von Grundrissplänen wurde im Kontext einer Analyse verschiedener Grundrisspläne häufig aufgefunden. Zudem wird auch dieser Erkennungsprozess wiederum durch einen zusätzlichen halbautomatischen Ansatz erweitert und hilft insbesondere bei vielen wandinternen Unterteilungen zufriedenstellende Ergebnisse zu erreichen. Nach Erfassung der Wandflächen und darin auftretende Öffnungen folgt die automatisierte Berechnung der Raumflächen sowie der Gebäudekontur. Sonderfälle wie in einigen Situationen die fehlende korrekte Unterscheidung zwischen Räumlichkeiten und Innenhöfen müssen durch manuelle Eingriffe des Anwenders oder der Anwenderin behoben werden. Raumflächen verhelfen topologische Beziehungen der Gebäudebestandteile auszubauen und ermöglichen strukturelle Fehler zu identifizieren. Abschließend erfolgt die automatisierte Erkennung von Außenflächen. Balkone oder Terrassen werden dabei ausgehend von der zuvor erfassten Gebäudekontur

detektiert. Horizontale Öffnungen wie Treppenhäuser oder Liftschächte können manuell hinzugefügt werden. Gebäudeelemente von erfolgreich analysierten Grundrissplänen lassen sich daraufhin durch das IFC-Datenmodell beschreiben und abspeichern. Werte wie Höheninformationen der Gebäudeelemente können dafür zuvor individuell angepasst werden. Zusätzlich zu geometrischen Informationen der einzelnen Gebäudeelemente sind in der exportierten IFC-Datei topologische Relationen vorhanden. Unter anderem ist auslesbar, welche Wandflächen und welche Wandöffnungen in Form von Türen und Fenstern einem Raum zugeordnet sind.

Die durchgeführte Evaluierung des entwickelten Systems lieferte insgesamt zufriedenstellende Ergebnisse. Untersucht wurden neun verschiedene Grundrisspläne von Wohnungen, welche von drei verschiedenen Personen erstellt wurden. In den meisten Plänen konnten durch eine Kombination der automatischen und der halbautomatischen Erkennung von Symbolen alle Tür- und Fensteröffnungen aufgefunden werden. Dennoch sei betont, dass die automatische Erkennung in einigen Fällen falsche Positive hervorruft und damit die Notwendigkeit manueller Korrekturen nicht ausgeschlossen werden kann. Von den korrekt aufgefundenen Wandöffnungen ausgehend wurde in allen Plänen nahezu die gesamte Wandstruktur automatisch detektiert.

Die Schlussfolgerung ist, dass für die geometrische und semantische Erfassung von Grundrissplänen im praktischen Einsatz neben generischen Ansätzen insbesondere die Robustheit des Systems im Vordergrund steht. Die strukturelle und inhaltliche Varietät der Grundrisszeichnungen erfordert eine hohe Fehlertoleranz des Systems. Unter anderem ist dafür eine Validierung mittels verschiedener Algorithmen und Ansätzen angebracht und kann die Qualität des Erkennungsprozesses verbessern.

Testpläne

Jede der folgenden Abbildungen gibt zunächst in Grafik (a) den jeweiligen Grundrissplan nach erfolgreichem Import wieder. Grafik (b) zeigt das Ergebnis der automatisierten Erkennung des Grundrissplanes und Grafik (c) die Visualisierung der exportierten IFC Datei. Für die Visualisierung der 3D-Modelle wurde wiederum die frei erhältliche Applikation *BIM Vision* herangezogen.

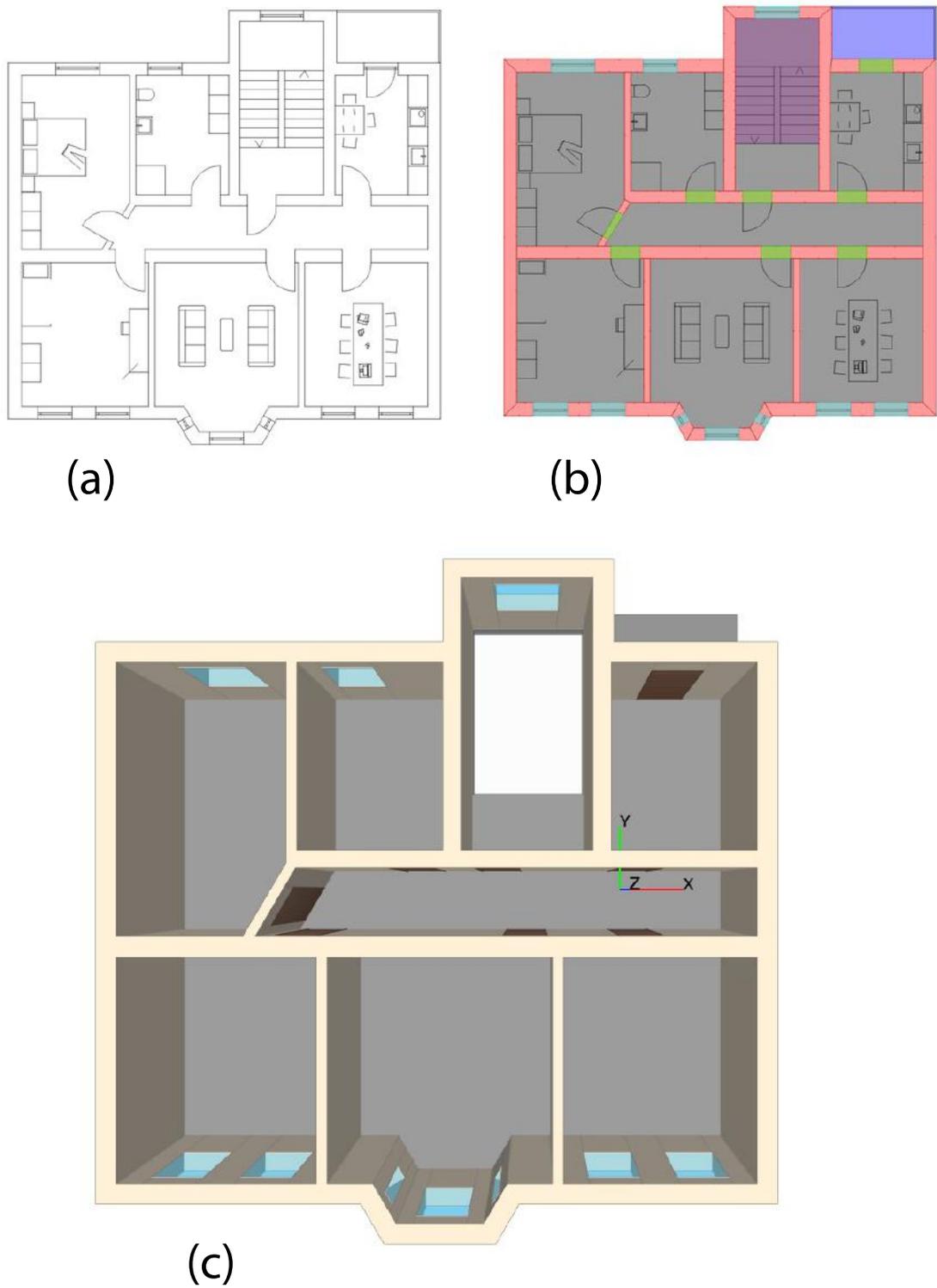
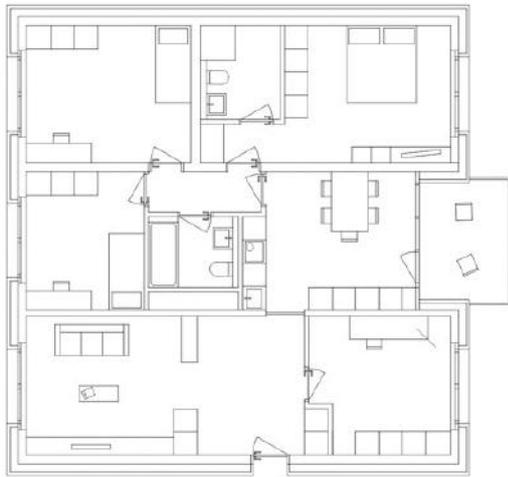


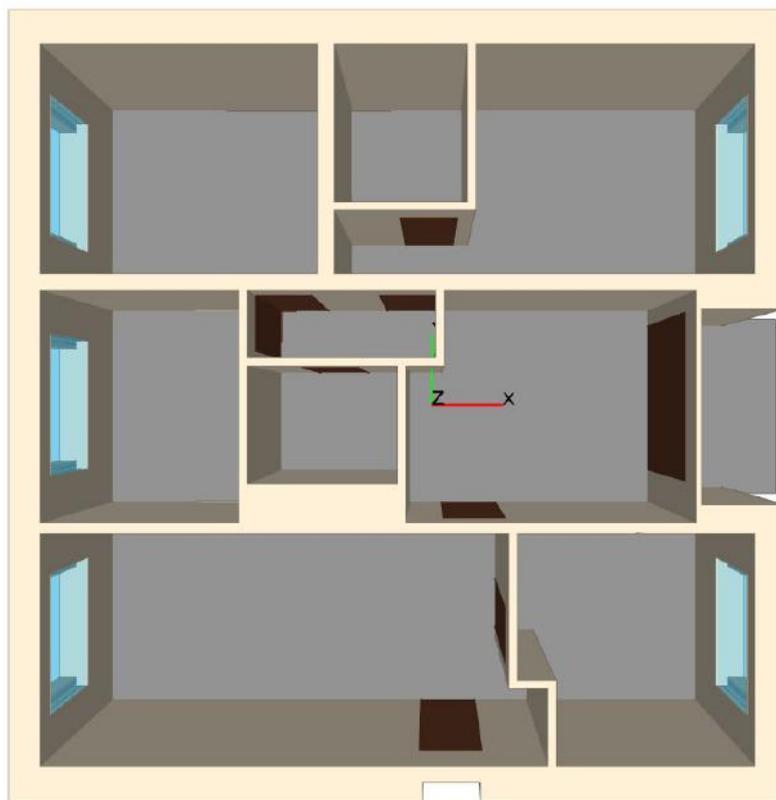
Abbildung A.1: Testplan #1 von Person A. Das Gebäude wurde vollständig ohne manuelle Eingriffe erkannt.



(a)

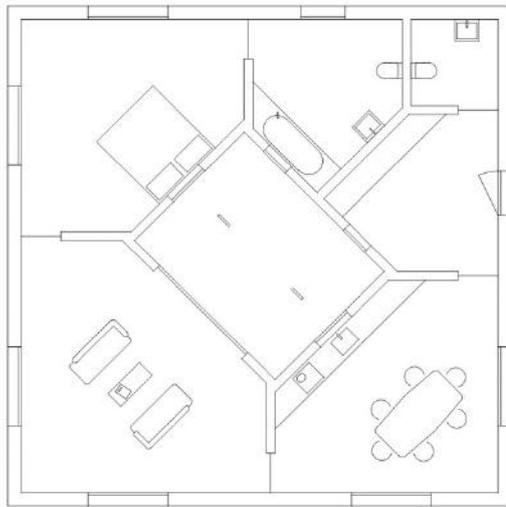


(b)

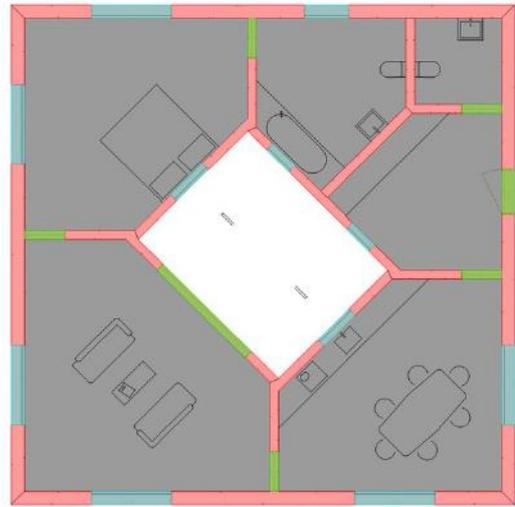


(c)

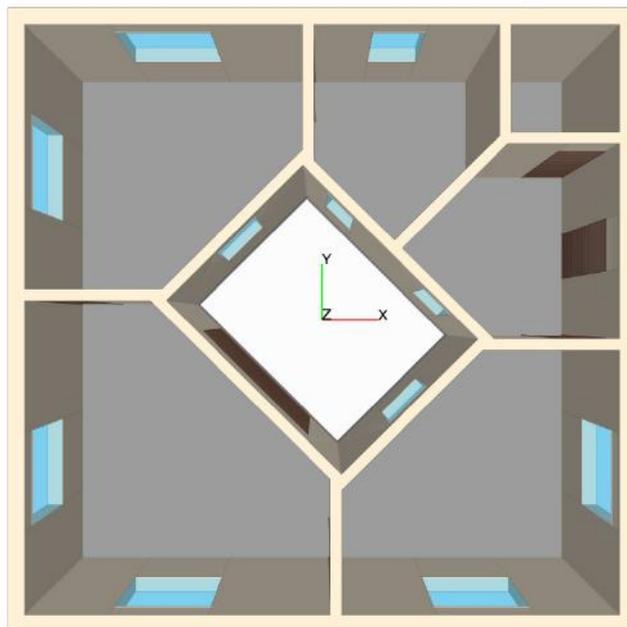
Abbildung A.2: Testplan #2 von Person A. Das Gebäude wurde vollständig mit fünf manuellen Eingriffen erkannt.



(a)



(b)



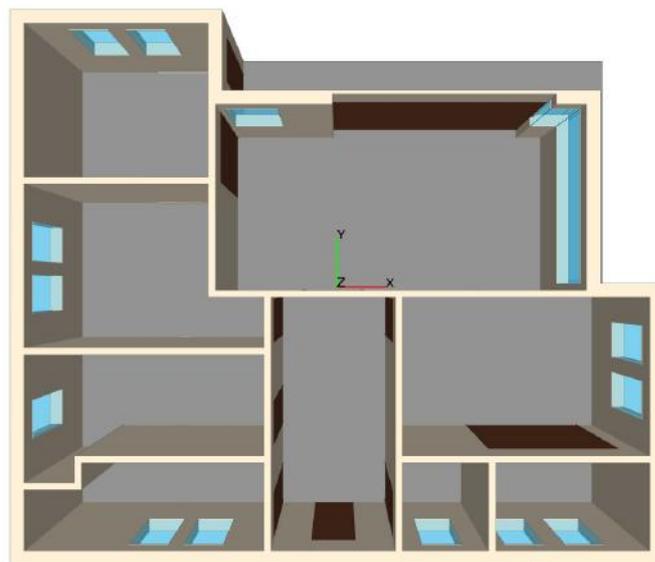
(c)

Abbildung A.3: Testplan #3 von Person A. Das Gebäude wurde vollständig ohne manuelle Eingriffe erkannt.



(a)

(b)



(c)

Abbildung A.4: Testplan #1 von Person B. Das Gebäude wurde vollständig mit fünf manuellen Eingriffen erkannt.

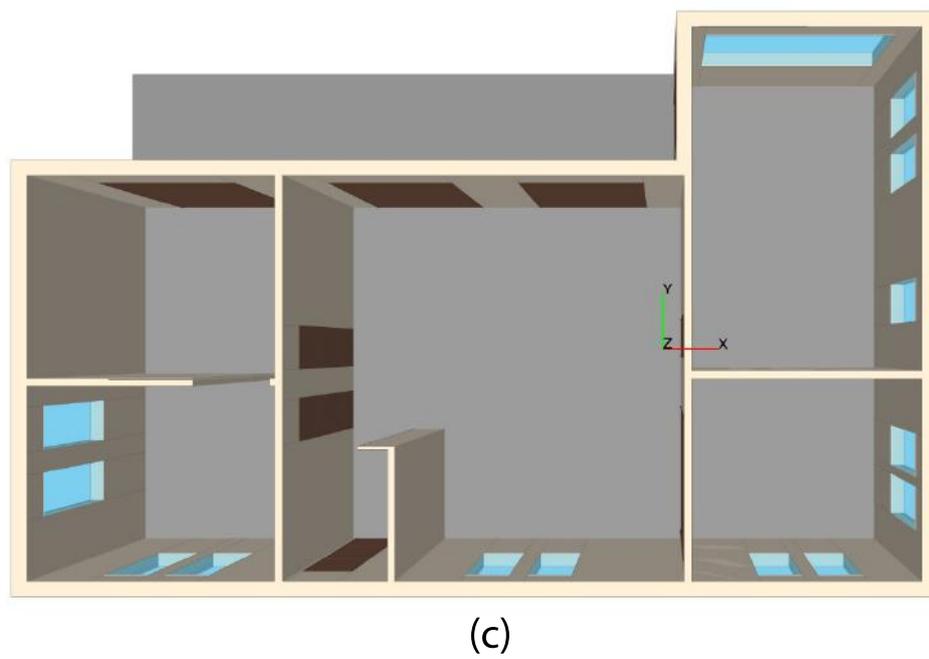
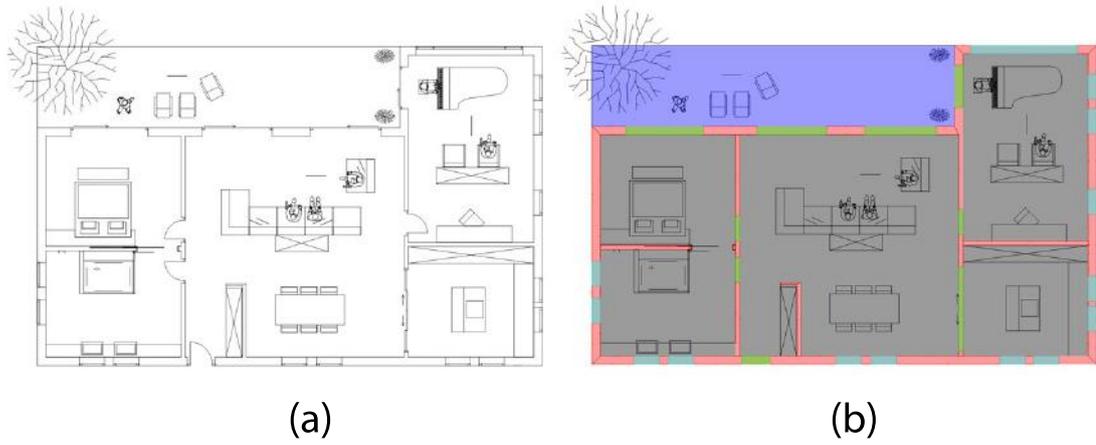


Abbildung A.5: Testplan #2 von Person B. Das Gebäude wurde nahezu vollständig mit zwei manuellen Eingriffen erkannt (ein Türsymbol konnte nicht erkannt werden).

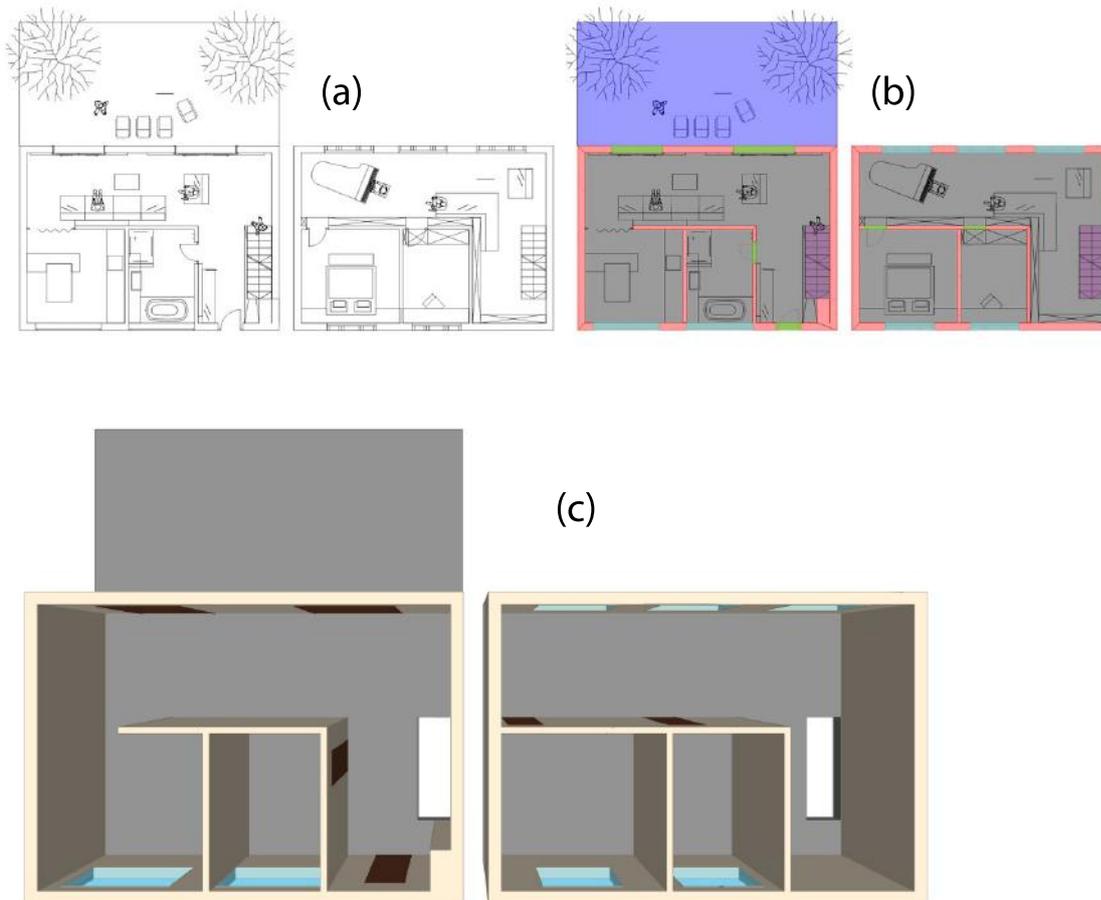


Abbildung A.6: Testplan #3 von Person B. Das Gebäude wurde nahezu vollständig mit vier manuellen Eingriffen erkannt (ein Türsymbol konnte nicht erkannt werden).

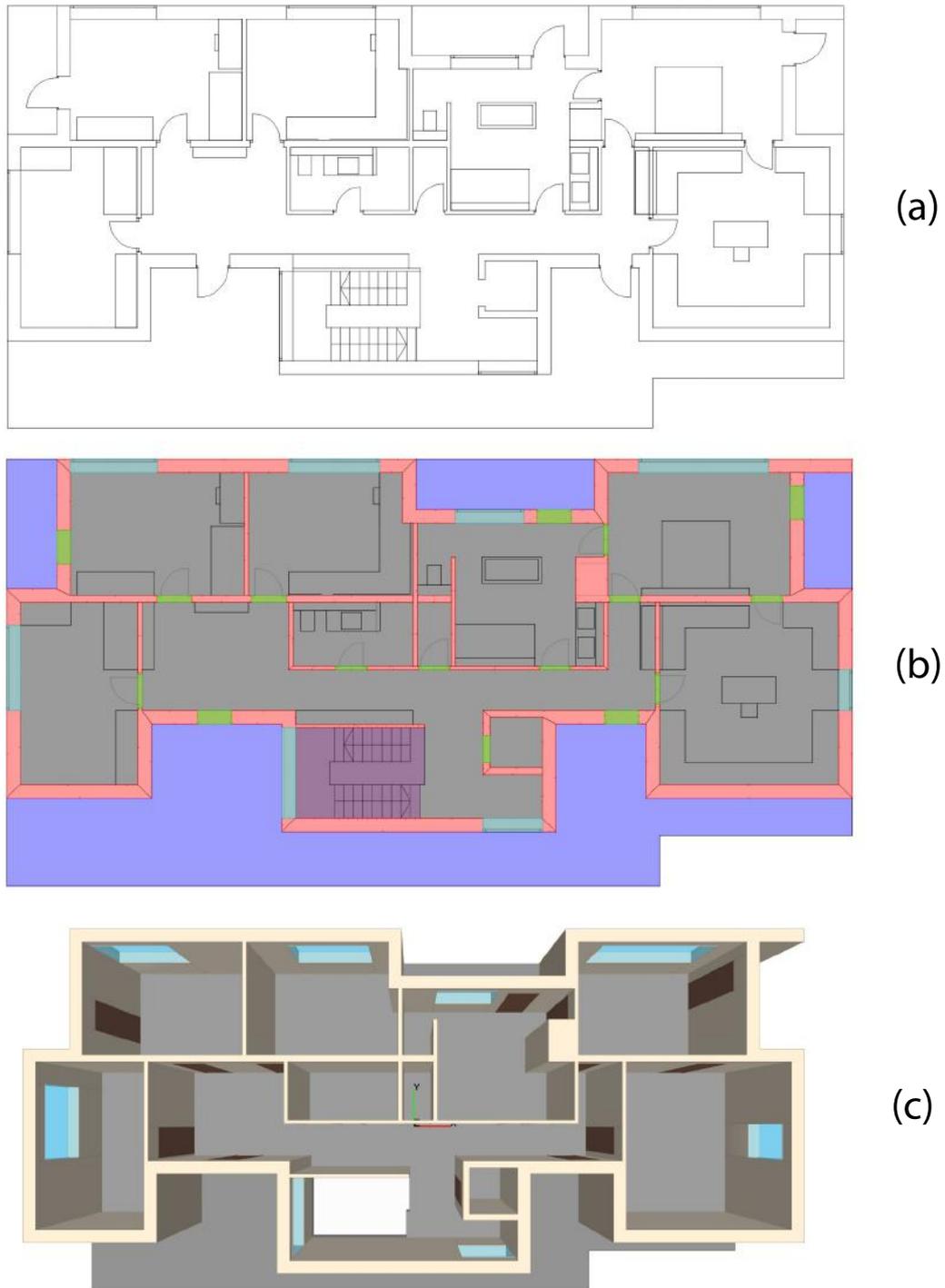


Abbildung A.7: Testplan #1 von Person C. Das Gebäude wurde vollständig mit sechs manuellen Eingriffen erkannt.

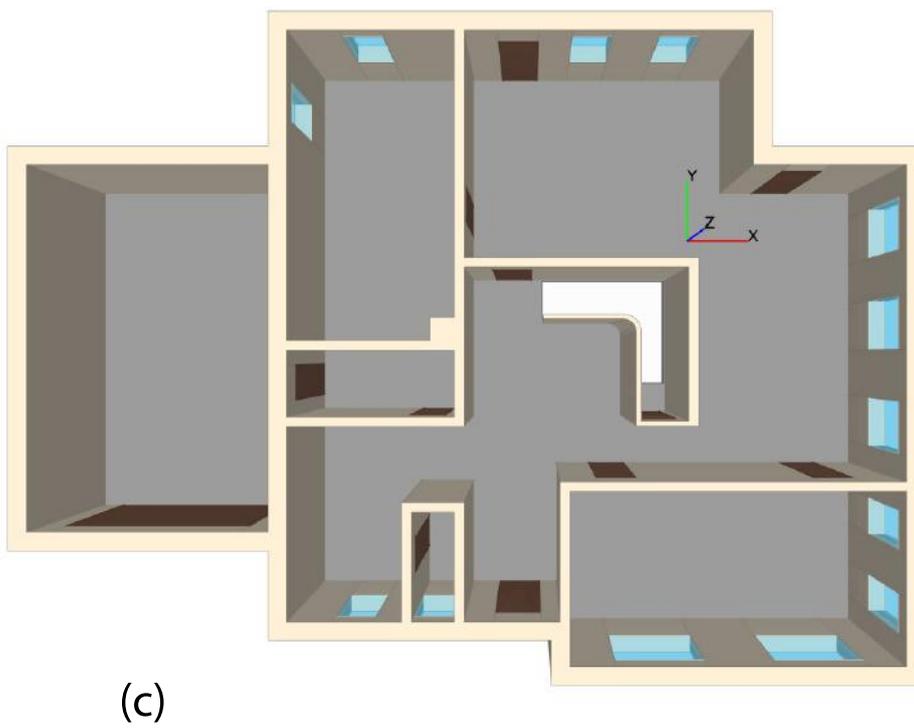
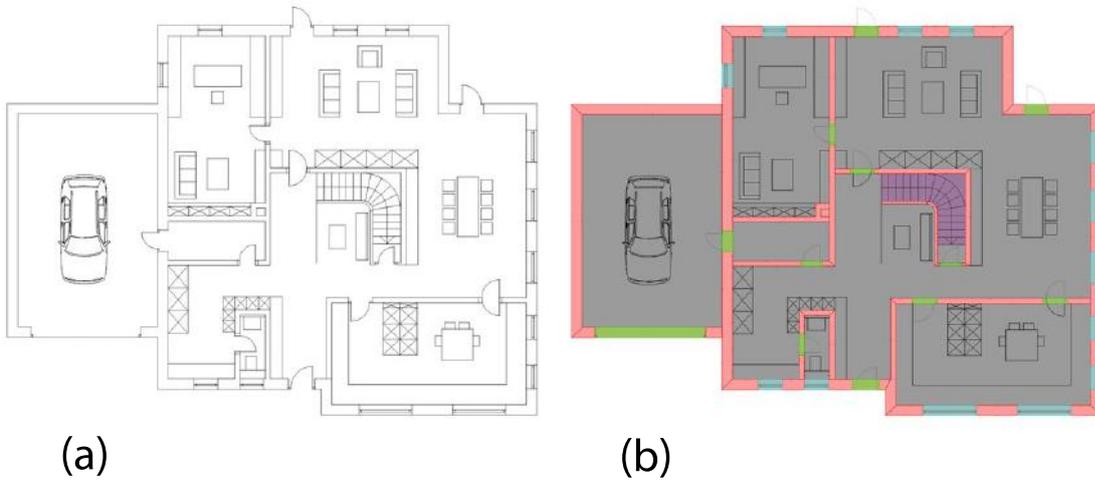


Abbildung A.8: Testplan #2 von Person C. Das Gebäude wurde vollständig mit drei manuellen Eingriffen erkannt.

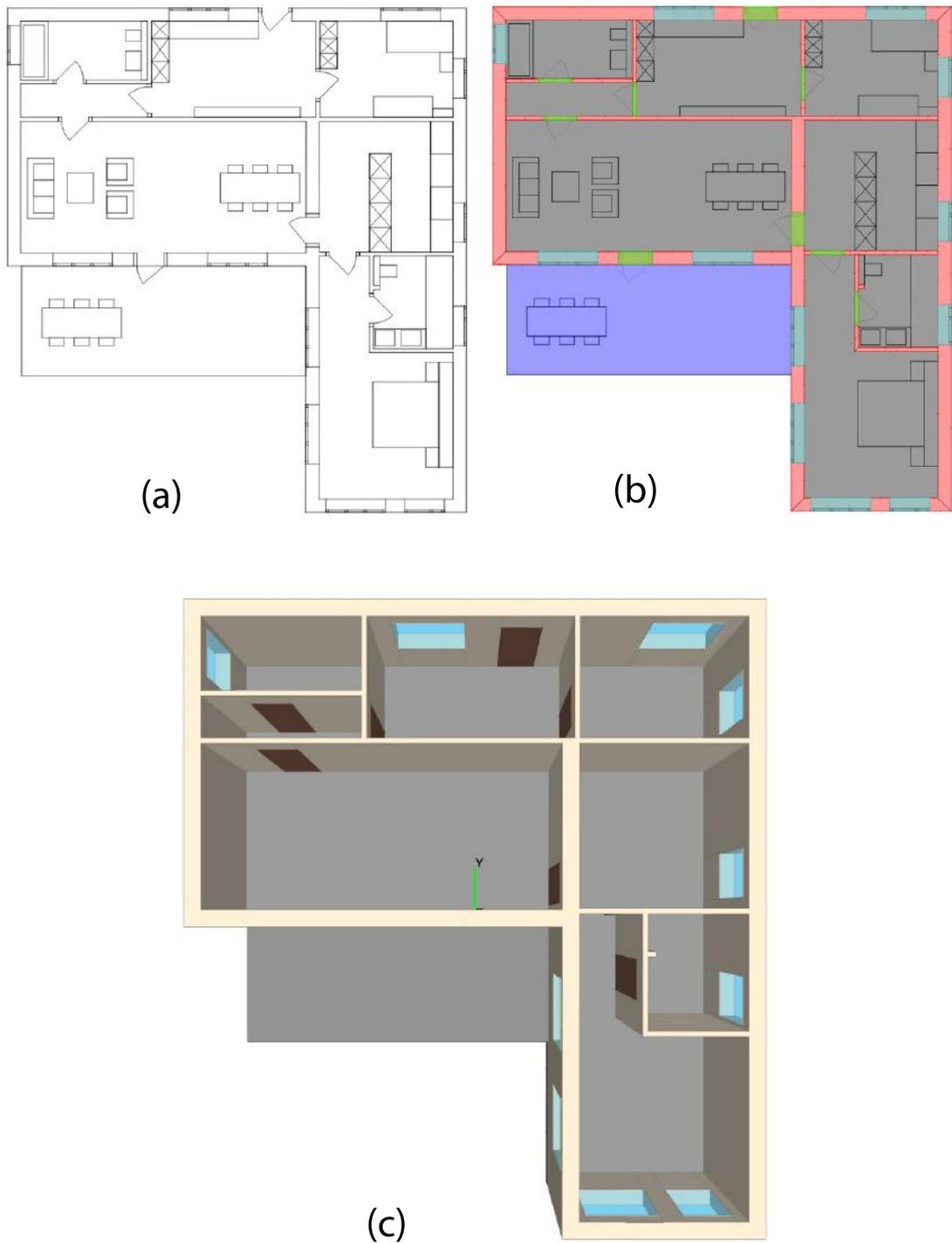


Abbildung A.9: Testplan #3 von Person C. Das Gebäude wurde vollständig mit vier manuellen Eingriffen erkannt.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Entwicklung der geometrischen Modelle in CAD-Applikationen	7
2.2	Beispiel CAD-Grundrissplan	9
2.3	Versionsgeschichte des IFC-Datenmodells.	11
2.4	Durch IFC beschriebenes Gebäudemodell	13
3.1	Systemaufbau für die Modellgenerierung aus Grundrissplänen	18
3.2	Spannbaum Generierung aus der Symbolvorlage	21
3.3	Virtuelle Relationen in der Symbolvorlage	22
3.4	Kreuzungen von Wandsegmenten, welche die Detektion von Wänden unterstützen	25
4.1	Ausschnitt eines Grundrissplans mit allen enthaltenen Informationen	32
4.2	Ausschnitt eines Grundrissplans mit für die Arbeit relevanten Informationen	33
4.3	Teilmenge an möglichen Türsymbolen	35
4.4	Teilmenge an möglichen Fenstersymbolen	36
4.5	Ausschnitte von möglichen Wandformen	37
4.6	Übersicht möglicher wandinterner Details	38
4.7	Unterschiedliche Darstellungen von Treppenhäusern	40
5.1	Grundlegende Systemkomponenten	42
5.2	Modulübersicht des Implementierten Systems.	44
5.3	Korrekturen nach Grapherzeugung	47
5.4	Semantischer Inhalt der Kanten	48
5.5	Wichtige Schritte bei der automatischen Erkennung von Türsymbolen	50
5.6	Notwendige Operationen nach Erkennung eines Türsymbols	51
5.7	Automatische Erkennung von Fenstersymbolen	52
5.8	Markierung von Symbolvorlagen	54
5.9	Automatisierte Markierung von Symbolvorlagen	57
5.10	Auffindbare Symbolvariationen durch Symbolvorlagen	59
5.11	Strukturabweichungen beim Auffinden von Symbolvorlagen	60
5.12	Türsymbol mit nicht eindeutiger Wanddicke	61
5.13	Konzept der Wanddetektion	62
5.14	Wandinterne Details beim Auffinden von Wänden	63
5.15	Strukturelle Fehler bei der Wandsuche	64
5.16	Erkennen von Raumflächen und Gebäudekonturen	66

5.17	Erfassen eines Raums, welcher von einem Raum umgeben ist	67
5.18	Detektion von Außenflächen	68
5.19	Unterteilen der aufgefundenen Wandflächen	70
5.20	Generiertes Gebäudemodell aus einem eingelesenen Grundrissplan	71
5.21	Grafische Oberfläche der entwickelten Anwendung CAD2IFC	73
5.22	Programmablaufplan des entwickelten Systems <i>CAD2IFC</i>	78
6.1	Durchschnittliche Erkennungsrate von Fenster- und Türsymbolen	84
6.2	Durchschnittliche Erkennungsrate von Wänden	86
6.3	Durchschnittliche Erkennungsrate von Räumen und Balkonen/Terrassen	88
6.4	Notwendige Interaktionen für die Generierung der Gebäudemodelle	89
6.5	Notwendige Interaktionen für die Generierung der Gebäudemodelle	89
6.6	Evaluierung der Symbolvorlagen-Generierung	90
A.1	Testplan #1 von Person A	96
A.2	Testplan #2 von Person A	97
A.3	Testplan #3 von Person A	98
A.4	Testplan #1 von Person B	99
A.5	Testplan #2 von Person B	100
A.6	Testplan #3 von Person B	101
A.7	Testplan #1 von Person C	102
A.8	Testplan #3 von Person C	103
A.9	Testplan #2 von Person C	104

Tabellenverzeichnis

2.1	IFC-Quelltext im IFC-SPF und IFC-XML Format	12
4.1	Kategorisierte Inhalte von Grundrissplänen.	31
5.1	Auflistung der unterschiedlichen Suchvorgänge einer Symbolvorlage	58
5.2	Standardparameter der entwickelten Applikation CAD2IFC	74
6.1	Ergebnisse der automatischen Symbolerkennung von Wandöffnungen.	82
6.2	Genauigkeit/Trefferquote der automatischen Erkennung von Wandöffnungen	83
6.3	Ergebnisse der halbautomatischen Symbolerkennung von Wandöffnungen	83
6.4	Ergebnisse der Detektion von Wandflächen	85
6.5	Genauigkeit und Trefferquote der automatischen Wanderkennung.	86

6.6	Ergebnisse der automatischen Erkennung von Räumen und Balkonen	87
-----	--	----

Akronyme

ASCII American Standard Code for Information Interchange.

BIM Building Information Modeling.

CAD Computer-Aided Design oder Computer-Aided Drafting.

DXF Drawing Interchange Format oder Drawing Exchange Format.

HMD Head-Mounted Display.

IFC Industry Foundation Classes.

ISO International Organization for Standardization.

PDF Portable Document Format.

SIFT Scale-invariant feature transform.

XML Extensible Markup Language.

Literaturverzeichnis

- [ALWD11] AHMED, S. ; LIWICKI, M. ; WEBER, M. ; DENGEL, A.: Improved automatic analysis of architectural floor plans. In: *International Conference on Document Analysis and Recognition IEEE*, 2011, S. 864–869
- [AST97] AH-SOON, C. ; TOMBRE, K.: Variations on the analysis of architectural drawings. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Document Analysis and Recognition IEEE*, 1997, S. 347–351
- [AWL⁺14] AHMED, S. ; WEBER, M. ; LIWICKI, M. ; LANGENHAN, C. ; DENGEL, A. ; PETZOLD, F.: Automatic analysis and sketch-based retrieval of architectural floor plans. In: *Pattern Recognition Letters* 35 (2014), Nr. 1, S. 91–100
- [BKKB15] BORRMANN, A. ; KÖNIG, M. ; KOCH, C. ; BEETZ, J.: *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Springer, 2015
- [CAx] *List of CAx companies*. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_CAx_companies, . – Abgerufen am 02.06.2016
- [CV00] CORDELLA, L.P. ; VENTO, M.: Symbol recognition in documents: a collection of techniques? In: *International Journal on Document Analysis and Recognition* 3 (2000), Nr. 2, S. 73–88
- [DGF12] DOMÍNGUEZ, B. ; GARCÍA, Á.L. ; FEITO, F.R.: Semiautomatic detection of floor topology from CAD architectural drawings. In: *Computer-Aided Design* 44 (2012), Nr. 5, S. 367–378
- [DM99] DOSCH, P. ; MASINI, G.: Reconstruction of the 3d structure of a building from the 2d drawings of its floors. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Document Analysis and Recognition IEEE*, 1999, S. 487–490
- [DTASM00] DOSCH, P. ; TOMBRE, K. ; AH-SOON, C. ; MASINI, G.: A complete system for the analysis of architectural drawings. In: *International Journal on Document Analysis and Recognition* 3 (2000), Nr. 2, S. 102–116

- [GZW12] GUO, T. ; ZHANG, H. ; WEN, Y.: An improved example-driven symbol recognition approach in engineering drawings. In: *Computers & Graphics* 36 (2012), Nr. 7, S. 835–845
- [IFC] *Summary of IFC Releases.* <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-releases/summary>, . – Abgerufen am 02.06.2016
- [KK11] KILMER, R. ; KILMER, W.O.: *Construction drawings and details for interiors: Basic skills.* John Wiley & Sons, 2011
- [KW10] KURZ, U. ; WITTEL, H.: *Böttcher/Forberg Technisches Zeichnen.* Springer, 2010
- [LBR09] LUQMAN, M.M. ; BROUARD, T. ; RAMEL, J.Y.: Graphic symbol recognition using graph based signature and bayesian network classifier. In: *Proceedings of the Tenth International Conference on Document Analysis and Recognition* IEEE, 2009, S. 1325–1329
- [LR14] LLADOS, J. ; RUSINOL, M.: Graphics recognition techniques. In: *Handbook of Document Image Processing and Recognition.* Springer, 2014, S. 489–521
- [LVSM01] LLADÓS, J. ; VALVENY, E. ; SÁNCHEZ, G. ; MARTÍ, E.: Symbol recognition: Current advances and perspectives. In: *Graphics Recognition Algorithms and Applications.* Springer, 2001, S. 104–128
- [LW13] LABISCH, S. ; WEBER, C.: *Technisches Zeichnen: Intensiv und effektiv lernen und üben.* Springer, 2013
- [LYYC07] LU, T. ; YANG, H. ; YANG, R. ; CAI, S.: Automatic analysis and integration of architectural drawings. In: *International Journal of Document Analysis and Recognition* 9 (2007), Nr. 1, S. 31–47
- [MDA11] MOLOO, R.K. ; DAWOOD, M.A.S. ; AULEEAR, A.S.: 3-Phase Recognition Approach to Pseudo 3D Building Generation from 2D Floor Plan. In: *Computing Research Repository* (2011)
- [Noa01] NOACK, R.: *Converting CAD Drawings to Product Models*, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, Diss., 2001
- [SRN08] SARCAR, M.M.M. ; RAO, K.M. ; NARAYAN, K.L.: *Computer aided design and manufacturing.* PHI Learning, 2008
- [SSC05] SU, F. ; SONG, J. ; CAI, S.: A vectorization system for architecture engineering drawings. In: *Graphics Recognition. Ten Years Review and Future Perspectives.* Springer, 2005, S. 11–22

- [Ste06] STEKOLSCHIK, A.: *Ein Beitrag zum ganzheitlichen Qualitätsmanagement von CAD-Modellen in der Produktentstehung*. Shaker, 2006
- [Tom98] TOMBRE, K.: Graphics documents: Achievements and open problems. In: *Proceedings of the Tenth Portuguese Conference on Pattern Recognition*, 1998, S. 11–17
- [TT14] TABBONE, S. ; TERRADES, O.R.: An overview of symbol recognition. In: *Handbook of Document Image Processing and Recognition*. Springer, 2014, S. 523–551
- [YW03] YAN, L. ; WENYIN, L.: Engineering drawings recognition using a case-based approach. In: *Proceedings of the Seventh International Conference on Document Analysis and Recognition IEEE*, 2003, S. 190–194
- [YWR09] YIN, X. ; WONKA, P. ; RAZDAN, A.: Generating 3d building models from architectural drawings: A survey. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 29 (2009), Nr. 1, S. 20–30
- [ZLF03] ZHI, G.S. ; LO, S.M. ; FANG, Z.: A graph-based algorithm for extracting units and loops from architectural floor plans for a building evacuation model. In: *Computer-Aided Design* 35 (2003), Nr. 1, S. 1–14
- [ZZW14] ZHU, J. ; ZHANG, H. ; WEN, Y.: A new reconstruction method for 3D buildings from 2D vector floor plan. In: *Computer-Aided Design and Applications* 11 (2014), Nr. 6, S. 704–714