

Projektplanungsmodelle und -methoden für den Rückbau von Bauwerken

PD Dr. Frank Schultmann

Universität Karlsruhe (TH), Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion,
Hertzstraße 16, 76187 Karlsruhe

E-mail: frank.schultmann@wiwi.uni-karlsruhe.de

Tel: + 49 721 608-4458; Fax: + 49 721 758909

Abstract

Vor dem Hintergrund einer sich verschärfenden Umweltgesetzgebung sowie der Erkenntnis, dass Bauabfälle sich grundsätzlich für eine Stoffkreislaufführung eignen, hat der Rückbau von Bauwerken in den letzten Jahren verstärkt an Bedeutung gewonnen. Um den im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz erhobenen Forderungen nach einer schadlosen Verwertung und der Vermeidung einer Schadstoffanreicherung im Produktionskreislauf nachzukommen, müssen Konzepte zur Produktion von Recyclingbaustoffen bereits die der Baustoffaufbereitung vorgelagerte Phase des Abbruchs von Bauwerken einbeziehen. Erste Vorschläge zur Ablösung eines unkontrollierten Abbruchs durch einen selektiven Gebäuderückbau wurden in den letzten Jahren entwickelt und in Form von Pilotprojekten erfolgreich in der Praxis umgesetzt. Unternehmen werden künftig in zunehmendem Umfang vor die Aufgabe gestellt, Rückbaukonzepte zu erarbeiten, die eine hochwertige Verwertung von Bauabfällen ermöglichen. Vor dem Hintergrund oftmals strenger Zeit- und Kostenvorgaben für einen Rückbau, begrenzter Verfügbarkeit von Personal und Betriebsmitteln, einer weitgehenden Unikatfertigung sowie wechselnder Standorte kommt dabei der projektorientierten Planung von Maßnahmen auf der Baustelle große Bedeutung zu.

Im Rahmen des Beitrages werden Ansätze zur Modellierung und Lösung der sich hieraus ergebenden Probleme zur Planung und Optimierung von (Rück-) Bauabläufen unter Verwendung von Projektplanungsmodellen und -methoden vorgestellt. Hierbei werden neben betriebswirtschaftlichen auch umweltrelevante sowie technische Fragestellungen im Zusammenhang mit der Planung von Rückbauprojekten aufgegriffen.

Ausgehend von einer Charakterisierung der Rahmenbedingungen des Rückbaus von Bauwerken werden produktionswirtschaftliche Anforderungen an Demontage- und Recyclingplanungssysteme präzisiert und eine Bestandsaufnahme der bislang vorliegenden Erfahrungen im Bereich des Gebäuderückbaus vorgenommen. Darauf aufbauend werden Planungsansätze vorgestellt, die eine stoffliche Bewertung von Bauwerken zum Ziel haben und gleichzeitig wesentliche Parameter zur Projektplanung bereitzustellen.

Zur Operationalisierung des Gebäuderückbaus werden anschließend Modelle der ressourcenbeschränkten Projektplanung herangezogen und auf den selektiven Rückbau von Gebäuden übertragen. Liegen Kapazitätsbeschränkungen für Personal oder Betriebsmittel vor, so konkurrieren verschiedene Demontevorgänge um die knappen Ressourcen. Zur Lösung dieses Allokationsproblems wird eine integrierte Termin- und Kapazitätsplanung vorgenommen, wobei insbesondere auf Besonderheiten der Baustellenfertigung eingegangen wird. Projektplanungsmodelle erlauben dabei sowohl die Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen als auch die Zulassung mehrerer Demontagevarianten, führen damit jedoch zu extrem komplexen Optimierungsproblemen. Zur Problemlösung bieten sich Operations-

Research-Verfahren der kombinatorischen Optimierung an, auf die im Rahmen des Beitrages kurz eingegangen wird.

Eine Anwendung der entwickelten Systeme zur Demontage- sowie zur Ablaufplanung auf reale Gebäude zeigt, dass sich durch Kombination von Gebäuderückbau und nachgeschalteter Aufbereitungstechnik eine Qualitätsverbesserung von Recyclingbaustoffen erzielen lässt. Zur Umsetzung der hierzu erforderlichen Maßnahmen werden unter Berücksichtigung individueller abfallwirtschaftlicher Rahmenbedingungen der jeweiligen Planungsregion, gebäude- und baustellenbezogener Besonderheiten, technischer sowie kapazitiver Restriktionen Ablaufpläne für den Gebäuderückbau berechnet. Die so vorgenommene kapazitätsorientierte Feinterminierung, bei der unterschiedliche Demontageszenarien simultan optimiert und bedarfszeitpunktgerechte Einsatzplanungen für die zur Demontage benötigten Ressourcen bestimmt werden, zeigt, dass sich erhebliche Zeit- und Kosteneinsparungen bei gleichzeitigen hohen Recyclingquoten realisieren lassen. Die für unterschiedliche Planungsregionen vorgenommenen Modellrechnungen weisen zudem nach, dass sich die Demontage von Gebäuden gegenüber einem konventionellen Gebäudeabbruch unter bestimmten Rahmenbedingungen bereits wirtschaftlich vorteilhaft realisieren lässt.

1 Einleitung

Die Bauwirtschaft induziert die größten anthropogen verursachten Stoffströme überhaupt. So werden in Deutschland jährlich etwa 1 Milliarde Tonnen mineralische Naturrohstoffe abgebaut, von denen etwa 250 Millionen Tonnen zur Herstellung von Baustoffen (ohne Straßenbaustoffe) verwendet werden. Bauabfälle¹ zählen zu den mengenmäßig bedeutsamsten Abfallströmen. Alleine das Aufkommen an Bauabfällen ohne Bodenaushub beläuft sich in Deutschland jährlich auf ca. 77 Millionen Tonnen, davon ca. 58 Millionen Tonnen aus dem Abbruch von Gebäuden [6]. Für Reststoffe aus dem Tiefbau, haben sich bereits gut eingeführte Verwertungswege etabliert, so dass die Schließung von Stoffkreisläufen hier bereits weit fortgeschritten ist. Die dabei eingesetzten Aufbereitungstechniken gelten als technisch ausgereift, insofern die Bauabfälle keine nennenswerten Bestandteile an Schad- oder Störstoffen² enthalten. Für die ca. 58 Millionen Tonnen Reststoffe jährlich, die aus dem Gebäudebestand durch Abbruch, Umbau oder Sanierung von Gebäuden ausgetragen werden, existieren dagegen bislang kaum schlüssige Lösungsvorschläge. Techniken zur Aufbereitung von Baureststoffen sind derzeit nicht in der Lage, aus heterogen zusammengesetzten Abbruchmassen hochwertige Sekundärrohstoffe herzustellen, so dass ein Großteil dieser Stoffe noch deponiert oder lediglich zu Produkten mit minderwertigen Qualitätsanforderungen aufbereitet wird.

Um dieser unbefriedigenden Situation entgegenzutreten und damit den im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz erhobenen Forderungen nach einer schadlosen Verwertung und der Vermeidung einer Schadstoffanreicherung im Produktionskreislauf nachzukommen, müssen Strategien zur Kreislaufführung von Baustoffen bereits die der Baustoffaufbereitung vorgelagerten Phasen der Sanierung, des Umbaus oder des Abbruchs von Bauwerken einbeziehen. Dem eigentlichen Recycling sollte daher eine Demontage von Gebäuden vorausgehen, bei der Wertstoffe zurückgewonnen und Schad- sowie Störstoffe gezielt von

¹ Der Begriff *Bauabfälle* umfasst Straßenaufbruch, Bauschutt, Baustellenabfälle sowie Bodenaushub. Die weiteren Ausführungen beschränken sich im wesentlichen auf *Bauschutt* aus dem Abbruch bzw. der Sanierung von Gebäuden.

² *Störstoffe* bezeichnen dabei qualitätsmindernde Bestandteile für die Verwertung mineralischer Reststoffe. *Schadstoffe* sind demgegenüber toxische und umweltgefährdende Stoffe.

verwertbaren Bestandteilen getrennt werden können. Ein solcher *selektiver Gebäuderückbau* beinhaltet die partielle oder komplette Demontage eines Bauwerkes in seine Bestandteile, wobei gut erhaltene Bauteile komplett wiederverwendet³ und die restlichen Baustoffe einer Aufbereitung zugeführt werden können. Während die gesamte Mengenrelation der bei einer Gebäudedemontage entstehenden Stoffgruppen durch die Bausubstanz des rückzubauenden Gebäudes fest vorgegeben ist, lässt sich die Zusammensetzung und der Vermischungsgrad der einzelnen Reststoffe, die wiederum entscheidenden Einfluss auf die Verwertungsqualität und -kosten haben, durch die Demontagetiefe bzw. die Selektivität des Gebäuderückbaus gezielt beeinflussen. So kann etwa durch den frühzeitigen Ausbau schadstoffbelasteter Bauteile im Zuge des Rückbaus ein Schadstoffeintrag in die verbleibenden aufzubereitenden Stoffe vermieden werden.

Die der Baustoffaufbereitung vorgelagerten Prozessstufen der Gebäudedemontage werden bei der Planung und Ausführung von Umbau, Sanierungs- oder Abbruchvorhaben derzeit in der Regel jedoch noch nicht systematisch einbezogen, was letztendlich dazu führt, dass noch immer große Mengen an Hochbaurestmassen in Recyclinganlagen als Stör- oder sogar Schadstoffe gelten, dementsprechend aussortiert werden müssen und durch die anschließende Deponierung für einen geschlossenen Stoffkreislauf unwiederbringlich verloren gehen.

Vorschläge zur Ablösung des Abbruchs durch einen selektiven Gebäuderückbau wurden in den letzten Jahren entwickelt und in Form erster Pilotprojekten auch in der Praxis umgesetzt. Dabei konnten durch weitgehende Demontage von Gebäuden erfolgversprechende Möglichkeiten aufgezeigt werden, so dass der Gesetzgeber mittlerweile den geordneten Rückbau von Bauwerken favorisiert und eine Ausgestaltung des Ablaufs von Abbrucharbeiten im Hinblick auf eine größtmögliche Verwertbarkeit von Bauabfällen fordert. Auch die Bauwirtschaft hat sich bereits vor einigen Jahren eine deutliche Reduzierung der abgelagerten Bauabfälle zum Ziel gesetzt. Zur Umsetzung dieser Forderungen sowie zur Erreichung dieser Ziele werden die betroffenen Planer sowie Bau- bzw. Abbruchunternehmen künftig vor die Aufgabe gestellt, Rückbau- und Recyclingkonzepte zu erarbeiten, die eine hochwertige Verwertung von Bauabfällen ermöglichen. Vor dem Hintergrund oftmals strenger Zeit- und Kostenvorgaben für einen Rückbau sowie begrenzter Verfügbarkeit von Personal und Betriebsmitteln kommt der operativen Rückbau- und Recyclingplanung große Bedeutung zu, für die bislang allerdings noch kaum adäquate Instrumente zur Verfügung stehen.

Im folgenden Abschnitt 2 werden zunächst kurz die Rahmenbedingungen des Rückbaus von Gebäuden charakterisiert. In Abschnitt 3 werden produktionswirtschaftliche Anforderungen an Demontage- und Recyclingplanungssysteme präzisiert, bevor sich Abschnitt 4 mit der Demontage- und Recyclingplanung von Bauwerken befasst. In Abschnitt 5 werden anschließend Modelle der ressourcenbeschränkten Projektplanung herangezogen und auf den selektiven Rückbau von Gebäuden übertragen. Abschnitt 6 widmet sich der Anwendung der vorgestellten Modelle, bevor in Abschnitt 7 ein abschließender Ausblick auf weitere Anwendungsmöglichkeiten gegeben wird.

³ Ein derartiges Bauteilrecycling ist unter dem Gesichtspunkt einer nachhaltigen Kreislaufführung erstrebenswert. Wie Erfahrungen zeigen, ist dies jedoch in der Regel auf wenige, meistens historisch wertvolle Bauteile beschränkt.

2 Rahmenbedingungen des Gebäuderückbaus

Der Rückbau löst seit einigen Jahren in zunehmendem Maße den Abbruch von Gebäuden ab. Dennoch liegen zum gegenwärtigen Zeitpunkt erst wenige Erfahrungen aus Praxisprojekten in dokumentierter Form vor. Im Rahmen verschiedener Pilotbaustellen konnten durch weitgehende Gebäudedemontage anstelle eines Abbruchs erfolgversprechende Möglichkeiten im Hinblick auf die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit des Gebäuderückbaus, bei gleichzeitiger Realisierung hoher Verwertungsquoten⁴ aufgezeigt werden. Die bisherigen Praxiserfahrungen aus diesen Pilotprojekten zeigen, dass die Berücksichtigung umweltschutzorientierter Zielsetzungen nicht zwingend zu höheren Kosten führen muss. Vergleiche zwischen selektivem Rückbau und konventionellem Abbruch belegen vielmehr, dass unter bestimmten abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Gebäuderückbau für bestimmte Gebäude bereits die ökonomisch günstigere Variante darstellt (vgl. Abbildung 1).⁵

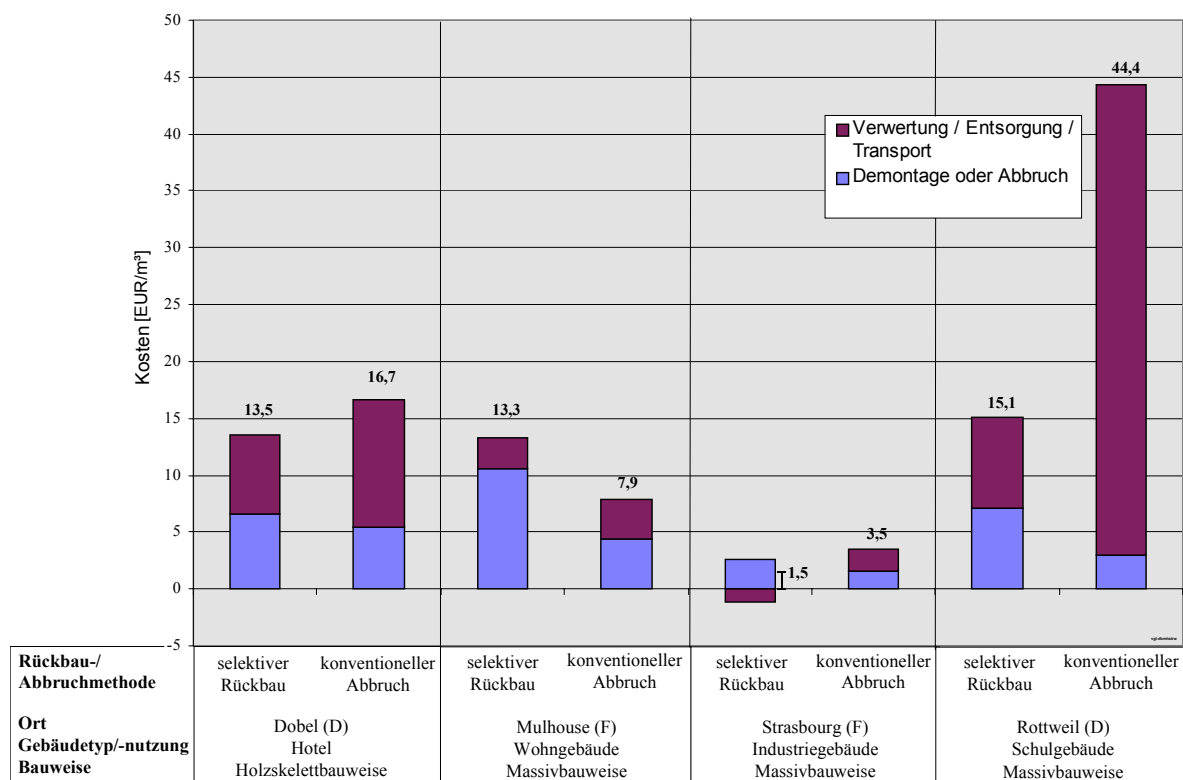


Abbildung 1: Vergleich der spezifischen Kosten zwischen Rückbau und Abbruch (in Anlehnung an [16], Daten aus [9], [10], [11], [13])

Obwohl erste Pilotprojekte vielversprechende Möglichkeiten aufzeigen, wird der selektive Rückbau von Gebäuden oder industriellen Anlagen bislang kaum konsequent umgesetzt. Das hat mehrere Gründe:

- Beim Bau von Gebäuden handelt es sich um eine Unikatfertigung, die erhebliche Auswirkungen auf die spätere Gebäudedemontage nach sich zieht. Im Gegensatz zu Serienprodukten wie etwa Autos oder Elektrogeräten, bei denen zum Zeitpunkt der Demontage lediglich marginale Änderungen gegenüber der Serienausstattung zu erwarten

⁴ Dabei sollte jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass die Verwertungsquote in keinem direkten Zusammenhang mit der Qualität (im Sinne einer bautechnischen Eignung sowie der Erfüllung von Umweltverträglichkeitsanforderungen) produzierter Sekundärbaustoffe steht. Vgl. hierzu [12].

⁵ Zu den rechtlichen, technischen und ökonomischen Rahmenbedingungen des Gebäuderückbaus in Deutschland vgl. [20].

sind, unterliegen Gebäude aufgrund ihres hohen Lebensalters während der Nutzungsphase einer ganzen Reihe von Veränderungen. Dementsprechend liegen zum Zeitpunkt der Abbruchplanung die für eine Gebäudedemontage erforderlichen Informationen über den stofflichen Aufbau der Bauwerke nur in unzureichender Form vor. Methoden zur Erhebung von Gebäudedaten im Gebäudebestand stehen bisher jedoch lediglich in Ansätzen zur Verfügung. Ein wesentlicher Ausgangspunkt für eine zielgerichtete Demontage bildet daher die stoffliche Erfassung rückzubauender Bauwerke im Rahmen einer Gebäudeauditierung⁶.

- Die Vorbereitung eines Rückbaus erfordert einen entsprechenden Planungsaufwand, mit dem die mittelständisch geprägte Abbruchindustrie in der Vergangenheit kaum konfrontiert war. Im Vergleich zum konventionellen Gebäudeabbruch ist ein komplexeres Tätigkeitsspektrum abzudecken. Bei begrenzten Platzverhältnissen auf dem Gelände des Abbruchobjektes ist es beispielsweise erforderlich, den Materialanfall so zu steuern, dass die Anzahl gleichzeitig benötigter Container oder Zwischenlagerflächen mit dem Platzangebot in Einklang gebracht werden kann. Während bei Bauprojekten zur Planung des Ablaufs bereits verstärkt Methoden des Projektmanagements zum Einsatz kommen, werden entsprechende Verfahren beim Rückbau von Gebäuden bislang nicht eingesetzt. Die Bestimmung techno-ökonomischer Parameter wie technikspezifischer Demontagezeiten oder -kosten wie auch der in Abhängigkeit der durchgeführten Demontageschritte entstehenden Recyclingkosten stellen die betroffenen Unternehmen aufgrund mangelnder Erfahrungswerte sowie fehlender methodischer Hilfsmittel noch vor erhebliche Probleme.
- Systeme zur Mengen-, Zeit-, Kapazitäts- und Kostenplanung werden im Bereich der Produktionswirtschaft seit einigen Jahren entwickelt. So stehen mittlerweile leistungsfähige Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme zur Verfügung. Diese eignen sich insbesondere für den Bereich der Serienfertigung, etwa im Bereich der Automobilproduktion, sind jedoch aufgrund unterschiedlicher systemimmanenter Schwächen nur bedingt bei projektorientierten Fertigungstypen wie der Baustellenfertigung einsetzbar. Insbesondere die Ermittlung optimaler Ablaufpläne unter Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen, denen beim Gebäuderückbau eine zentrale Bedeutung zukommt, ist für praxisrelevante Problemgrößen aus betriebswirtschaftlicher Sicht noch mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden.

Um die von der Bauwirtschaft gesetzten hochgesteckten Verwertungsziele dauerhaft zu erreichen sowie den gesetzgeberischen Forderungen einer recyclinggerechten Ausgestaltung von Abbrucharbeiten nachzukommen, werden die betroffenen Unternehmen zukünftig vor die Aufgabe gestellt, Planungskonzepte für den Gebäuderückbau zu entwickeln und umzusetzen. Dabei reicht es nicht aus, Rückbauempfehlungen in Form von Leitfäden (vgl. [14]) zur Verfügung zu stellen. Zur Entscheidungsvorbereitung bedarf es vielmehr zusätzlicher Planungsmethoden, die es erlauben, betriebswirtschaftliche sowie umweltrelevante Auswirkungen alternativer Demontagevarianten eines Gebäuderückbaus bereits im Vorfeld der konkreten Umsetzung auf der Baustelle zu überprüfen, um so die Möglichkeiten einer Demontage von Gebäuden ökonomisch effizient ausschöpfen zu können. Die methodischen Grundlagen eines derartigen Planungskonzeptes werden im Folgenden umrissen.

⁶ Im Zuge einer *Gebäudeauditierung* lassen sich Gebäude stofflich erfassen und bewerten. Darüber hinaus können problematische Bereiche wie etwa kontaminierte Gebäudeteile oder schlecht demontierbare Bauteile frühzeitig identifiziert und eingrenzt werden. Zur Methodik der Gebäudeauditierung sowie deren Unterstützung durch EDV-gestützte Planungssysteme vgl. [19].

3 Produktionswirtschaftliche Einordnung des Gebäuderückbaus

Die Produktionsplanung, zu deren Aufgabengebiet sich auch der Rückbau von Bauwerken zuordnen lässt, befasst sich mit der Planung der herzustellenden Produkte (Recyclingbaustoffe bzw. wiederverwendbare Bauteile), der dafür erforderlichen Produktionsfaktoren (Ressourcen) sowie der Planung des eigentlichen Produktionsprozesses (Gebäuderückbau). Sie erstreckt sich je nach Tragweite und Zeithorizont der zu planenden Aufgabe von der strategischen über die taktische bis zur operativen Planung. Generell lässt sich die Produktionsplanung in die drei Planungsstufen Programmplanung, Bereitstellungsplanung und Ablaufplanung untergliedern. Aufgabe der Produktionsprogrammplanung ist die Festlegung von Art und Menge der herzustellenden Produkte. Im Rahmen der Bereitstellungsplanung werden die zur Realisierung des geplanten Produktionsprogramms erforderlichen Produktionsfaktoren (Betriebsmittel, Werkstoffe, Arbeitskräfte) ermittelt und festgelegt. Die *Ablaufplanung* als dritte Stufe der Produktionsplanung bestimmt den zeitlichen, mengenmäßigen und räumlichen Produktionsvollzug. Hierbei werden die vorliegenden Aufträge auf vorhandene Produktionsanlagen zugeordnet. Die Ablaufplanung umfasst somit im Rahmen der *Terminplanung* die Festlegung von Start- und Endterminen der durchzuführenden Arbeitsgänge sowie die Abstimmung des hierdurch bestimmten Kapazitätsbedarfs mit dem vorhandenen Kapazitätsangebot (*Durchlauf- und Kapazitätsterminierung*). Darüber hinaus wird im Rahmen der *Reihenfolgeplanung* die Zuordnung der Reihenfolgen der zu bearbeitenden Aufträge vorgenommen. Die Ablaufplanung ist somit tendenziell der taktischen-operativen, d.h. der zeitlich kurzfristigen Ebene, zuzuordnen. Die dargestellten Planungsstufen lassen sich jedoch nicht klar gegeneinander abgrenzen; es sind vielmehr Interdependenzen zwischen den einzelnen Bereichen, etwa durch Rückkopplung der Ablaufplanung zu der vorgelagerten Programmplanung, zu berücksichtigen.

Die Ausprägungsformen der Ablaufplanung sind insbesondere abhängig vom jeweiligen Fertigungstyp. Während der Gebäuderückbau vom Fertigungstyp her dem (Neu-)Bau gleicht, sind hinsichtlich der Fertigungsstruktur Unterschiede zu verzeichnen. Im Gegensatz zum (Neu-)Bau ist der Rückbau insbesondere durch die gegenläufige Produktionsstruktur gekennzeichnet. Dabei handelt es sich beim Gebäuderückbau um eine divergente Produktion, bei der aus wenigen Teilen, im einfachsten Fall aus einem Gebäude, eine ganze Reihe von Erzeugnissen, in diesem Fall unterschiedliche Reststoffe, entstehen. Darüber hinaus entstehen beim Abbruch von Gebäuden oder der Demontage einzelner Bauteile zwangsläufig mehrere Reststoffarten gleichzeitig, die in der Regel unterschiedlichen Verwertungsoptionen zugeordnet werden müssen. Es handelt sich hierbei somit um einen *Kuppelproduktionsprozess*. Die gesamte Mengenrelation der hierbei entstehenden Stoffgruppen ist durch die vorgegebene Bausubstanz des rückzubauenden Gebäudes fest vorgegeben. Der Vermischungsgrad der einzelnen Reststoffe, der entscheidenden Einfluss auf die Verwertungsqualität der nach einem Abbruch vorliegenden Baureststoffe hat, ist dagegen sowohl durch die Selektivität bzw. die Demontagetiefe als auch durch ablaufplanerische Entscheidungen, gezielt beeinflussbar. Es handelt sich beim Gebäuderückbau somit um einen lenkbaren Kuppelproduktionsprozess.

Bedingt durch die Fertigungsstruktur, die hohe Komplexität der betroffenen Bauobjekte sowie die wechselnden Produktionsstandorte unterscheidet sich die Ablaufplanung bei der Baustellenfertigung wesentlich von der Ablaufplanung der Serien- oder Werkstattfertigung. An die Planung der Bereitstellung benötigter Produktionsfaktoren sowie die Ablaufplanung des Produktionsprozesses auf der Baustelle sind daher besondere Anforderungen zu richten. Bei der Baustellenfertigung werden regelmäßig für das Projekt eigene Organisationseinheiten gebildet, wobei Methoden des Projektmanagements zum Einsatz kommen (vgl. hierzu [1]).

Zur Planung des Ablaufs sowie zur Überwachung des Projektfortschritts werden bei größeren Neubauprojekten insbesondere Methoden der Netzplantechnik herangezogen. Hierbei wird im Rahmen der Strukturplanung das Projekt in einzelne Teilvorgänge zerlegt, deren Abhängigkeiten untereinander in einem Projektstrukturplan veranschaulicht werden können. Bei der anschließenden Zeitplanung wird für die einzelnen Vorgänge der zeitliche Umfang ermittelt. Die Kapazitätsplanung untersucht im dritten Schritt die Ressourcenbeanspruchung, die mit der Durchführung der einzelnen Vorgänge verbunden ist. Zielsetzung dieses sukzessiven Planungskonzeptes ist in der Regel die Ermittlung einer zeitminimalen Projektdauer.

Aufgrund der aufgezeigten Besonderheiten bezüglich wechselnder Produktionsstandorte und den damit verbundenen Ortswechseln der zur Produktion benötigten Ressourcen kommt der Kapazitätsplanung bei der Baustellenfertigung zentrale Bedeutung zu. Probleme der Zeit- oder Kostenplanung, die Kapazitätsbeschränkungen berücksichtigen, lassen sich im Wesentlichen in die folgenden drei Klassen einteilen: Probleme, die lediglich eine Ermittlung des Kapazitätsbedarfs und seine Darstellung mit Hilfe einer Kapazitätsbelastungskurve zum Gegenstand haben, werden als *Resource Accumulation*-Probleme bezeichnet [28]. Das *Resource Levelling* umfasst die Einplanung der einzelnen Vorgänge des Projektes in der Art, dass die Schwankung des Einsatzmittelbedarfs möglichst gering gehalten wird [29]. Ziel des *Resource Allocation*-Problems ist die effiziente Verteilung der Ressourcen innerhalb eines Projektes unter Einhaltung von Ressourcenrestriktionen [7]. Ein spezieller Typ von Ressourcenallokationsproblemen zielt auf die Berücksichtigung von zeitlichen Aspekten ab, besser bekannt als *Scheduling*-Probleme. Zur Lösung derartiger Probleme bieten sich Operations-Research-Verfahren an, worauf in Abschnitt 5 näher eingegangen wird.

Zur Unterstützung der Produktionsplanung werden bereits seit den achtziger Jahren computer-gestützte Systeme, sogenannte Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme (PPS-Systeme) entwickelt, die in der Praxis mittlerweile weite Verbreitung gefunden haben. Die Grundkonzeption von PPS-Systemen lässt sich in die Bausteine

- Primärbedarfsplanung (teilweise auch als Produktionsprogrammplanung bezeichnet),
- Mengenplanung,
- Terminplanung sowie
- Produktionssteuerung

untergliedern.

PPS-Systeme sind weniger auf strategische Fragestellungen ausgerichtet, sondern unterstützen die Produktionsplanung und -steuerung vorwiegend im operativen Bereich [4]. Sie decken damit grundsätzlich einen Teilbereich der beim Gebäuderückbau vordringlich anzugehenden Probleme ab. PPS-Systeme sind jedoch vorwiegend auf die Serienfertigung zugeschnitten und daher aufgrund der aufgezeigten Besonderheiten nur bedingt tauglich für den Einsatz bei Baustellenfertigung. Einem Einsatz der klassischen PPS-Konzepte für die Demontageprobleme bei Gebäuden stehen darüber hinaus einige systemimmanente Schwächen von PPS-Systemen entgegen, die im Wesentlichen auf dem sukzessiven Planungskonzept des MRP II basieren⁷, das nach wie vor die Grundstruktur der momentan verfügbaren PPS-Systeme prägt. Hauptkritikpunkte ergeben sich zum einen aus der Vernachlässigung der Interdependenzen zwischen den einzelnen oben genannten Planungsstufen. Eine Rückkopplung zwischen vor- und nachgelagerten Stufen findet in der

⁷ MRP II: Manufacturing Resource Planing.

Regel nicht statt. Darüber hinaus werden Produktionsengpässe in keiner Planungsphase systematisch erfasst. Wie bereits erläutert, kommt jedoch der Berücksichtigung knapper Ressourcen gerade bei der Baustellenfertigung eine entscheidende Bedeutung zu.

Neuere Ansätze fordern daher eine Ablösung der bislang vorherrschenden erzeugnisorientierten Konzepte durch eine Kapazitätsorientierung. Hierbei sollen durch die Berücksichtigung von Kapazitätsrestriktionen auf allen Planungsebenen die genannten Schwachpunkte umgangen werden. Um dabei einerseits unterschiedliche fertigungsorganisatorische Aspekte und andererseits auch die durch gemeinsame Nutzung von Ressourcen durch mehrere Erzeugnisse hervorgerufenen Interdependenzen einbeziehen zu können, sollte ein derartiges kapazitätsorientiertes PPS-System statt einer Sukzessivplanung einen hierarchischen Aufbau aufweisen. Hierzu wurden bereits modular aufgebaute Systeme vorgeschlagen, die unterschiedliche Organisations- bzw. Fertigungstypen durch Aufteilung des Produktionssystems in einzelne Produktionssegmente explizit berücksichtigen [4]. Dabei gliedert sich die Planung in vier Ebenen auf:

- (1) Aggregierte Gesamtplanung,
- (2) Kapazitierte Hauptproduktionsprogrammplanung,
- (3) Detaillierte Losgrößen- und Ressourceneinsatzplanung,
- (4) Segmentspezifische Feinplanung und -steuerung.

Die Planung wird mit zunehmender Planungstiefe und abnehmendem Planungshorizont verstärkt auf den jeweiligen Fertigungstyp zugeschnitten, so dass insbesondere für die Ebenen (3) und (4) segmentspezifische Lösungen zu entwickeln sind.

Eine Umsetzung dieses Konzeptes sieht für den Rückbau von Gebäuden wie folgt aus:

Im Rahmen der kapazitierten Hauptproduktionsprogrammplanung sind, auf Basis bereits vorliegender Aufträge, für unterschiedliche Baustellen aggregierte Kapazitätsbeanspruchungen zu ermitteln und dezentrale, baustellenbezogene Produktionsprogramme aufzustellen und zu koordinieren. Hierbei ist sicherzustellen, dass potenzielle Engpassbereiche wie etwa der Einsatz eines bestimmten Großgerätes auf mehreren Baustellen frühzeitig aufgedeckt und die erforderlichen Kapazitätsanpassungen eingeleitet werden. Der Planungshorizont dürfte dabei in diesem Schritt je nach Anzahl und Ausmaß der (Rück-)Baumaßnahmen im Bereich von Tagen bis mehreren Wochen liegen. Als Ergebnis dieser Planungsebene werden die Kapazitätsangebote von Arbeitskräften und Maschinen für die unterschiedlichen Baustellen ermittelt sowie Eckwerte, beispielsweise Fertigstellungstermine, für einzelne Baustellen festgelegt. Konkret könnte ein Engpassausgleich auf dieser Stufe etwa so erfolgen, dass ein auf mehreren Baustellen benötigtes Spezialgerät unter Berücksichtigung der jeweiligen Arbeitsreihenfolgen einzelnen Baustellen auf Wochen- oder Tagesbasis zugeteilt würde.

Die Vorgaben der Hauptproduktionsprogrammplanung (2) gehen somit als Ausgangsgrößen in die nachfolgenden Planungsschritte ein. Während sich bei Serien- oder Werkstattfertigung im kurzfristigen Bereich die beiden weiteren Planungsebenen (3) und (4) anbieten, ist der Rückbau von Gebäuden, wie bereits erläutert, dem Typ der Einzelfertigung zuzuordnen. Die Losgrößenplanung ist bei diesem Fertigungstyp Bestandteil vorgelagerter Planungsstufen, so dass die Ressourceneinsatz- und Feinplanung beim Gebäuderückbau in einem Schritt zusammengefasst werden kann.⁸ Aufgrund des kurzen Planungshorizontes von wenigen Tagen oder Stunden sind hier ökonomische Zielkriterien in der Regel nicht angebracht, so

⁸ In Anlehnung an [4] kann diese Planungsebene als „detaillierte Belegungsplanung von Demontage-ressourcen“ bezeichnet werden.

dass statt dessen nichtmonetäre, in der Regel zeitbezogene Zielgrößen herangezogen werden. Durch die Ergebnisse der vorgelagerten Planungsstufen sind zudem für die operative, kurzfristig angelegte Planung wesentliche Rahmendaten festgelegt, welche den Spielraum der kurzfristig auswählbaren Alternativen entsprechend eingrenzen. Ist beispielsweise die Entscheidung über den Rückbau eines Gebäudes getroffen, ist die Umsetzung in Form eines konkreten Demontageplans vorzunehmen, der neben ökonomischen insbesondere auch technische sowie umweltrelevante Gesichtspunkte berücksichtigen muss. Dabei rücken verstärkt operative Fragestellungen in den Vordergrund wie etwa nach

- der Ablauforganisation auf der Baustelle,
- der zu erwartenden Baustellendauer,
- Art, Menge und Zeitpunkt der zur Demontage auf der Baustelle bereitzustellenden Ressourcen (Personal und Betriebsmitteln) sowie
- den damit verbundenen Demontage- und Entsorgungskosten.

Die Ressourceneinsatz- und Feinplanung kann bei der Einzelfertigung als Projektplanungsproblem formuliert werden, bei dem eine kombinierte Termin- und Kapazitätsplanung vorgenommen wird.⁹ Die Formulierung derartiger Modelle für den Gebäuderückbau ist Gegenstand nachfolgender Ausführungen.

4 Stoffstromorientierte Demontage- und Recyclingplanung

Zur recyclinggerechten Gewinnung der beim Gebäuderückbau anfallenden Stoffe ist die Demontage frühzeitig auf die nachgelagerten Aufbereitungsschritte auszurichten. Mit Hilfe eines computergestützten Planungssystems lassen sich Gebäudebestandsdaten wie Bauteilaufkommen und -zusammensetzung sowie eine integrierte Demontage- und Recyclingplanung für den Gebäuderückbau vornehmen ([16], [17]). Abbildung 2 veranschaulicht exemplarisch anhand einer Bildschirmmaske die im Rahmen der **Demontageplanung** zu spezifizierenden Arbeitsschritte, hier als „Konfiguration von Demontagegruppen“ bezeichnet. Art und Anzahl der Demontagegruppen hängen dabei vom jeweils rückzubauenden Bauwerk, den technologisch determinierten Reihenfolgebeziehungen, der gewählten Demontagestrategie, dem geforderten Ergebnis der Demontage - beispielsweise einer vorgegebenen Demontagetiefe oder Recyclingquote - oder auch den zur Verfügung stehenden Demontagetechniken ab.

⁹ Sollen Aspekte der Losgrößenplanung etwa im Rahmen der Koordinierung mehrerer Baustellen einbezogen werden, ergeben sich Multi-Projektplanungsprobleme, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird.

Demontagegruppen konfigurieren

Gebäude-Nr.: 1 Demontage Szenario-Nr.: 3

Demontagegruppe: 12000 Sanitäre Installationen

Demontagegruppen-Hilfe **Bisher definierte Demontagegruppen**

Bauteile der Demontagegruppe				
Nr.	Bauteil	Raum	Anzahl	geplante Demontage dauer [h]
41220	Rohrleitungen	00000	66	12,4
41230	Wassereerwärmer	00000	5	1,4
41241	Waschtisch	00000	5	1,8
41242	WC	00000	1	0,1
41243	Badewanne	00000	2	0,6
41244	Dusche	00000	1	0,3
*				

Ressourcen der Demontagegruppe				
Nr.	Ressource	Kapazität	Einheit	Kapazität
7	Trennschleifer	16,6	h	
50	Demonteur	16,6	h	
27	Container Metalle	0,1	Stück	43,0 kg
28	Container Elektronikschrott	0,2	Stück	15,0 kg
29	Container Plastik	0,1	Stück	9,8 kg
31	Container mineralische Fraktionen (rc-fähig)	0,2	Stück	159,2 kg
35	Container Metalle (zur Wiederverwertung)	1,3	Stück	1.171,6 kg
70	Containerstellplatz	5,0	Stück	
*				

Netzwerkaufbau: Vorgänger der Demontagegruppe

Nr.	Demontagegruppe
0	Projektstart
*	

Vorherige Demontagegruppe **Nächste Demontagegruppe** **Demontagegruppe löschen** **Demontagegruppe Suchen** **Schließen**

Abbildung 2: Systemgestützte Demontageplanung für Gebäude [16]

Im Zuge der **Recyclingplanung** werden die einzuschlagenden Verwertungs- und Entsorgungswege beim Rückbau festgelegt. Hierzu sind zunächst die verfügbare Aufbereitungstechnologien zu erfassen. Abbildung 3 stellt etwa die Berücksichtigung einer mobilen Baustoffaufbereitungsanlage dar.

Anlagenkonfiguration erfassen (mobile Anlagen)

Schematisierte Darstellung der eingesetzten Aufbereitungsanlage

Input → Vorbrecher → Sortierband → Nachbrecher → Siebanlage → Output

Auswahl Vorbrecher: Backenbrecher

Auswahl Sortierband: <kein Sortierband>

Auswahl Nachbrecher: <kein Nachbrecher>

Anlagen-Art: mobile Anlage

Anlagenbeschreibung:

Trockene Trennverfahren: mobile Anlage (ohne Störstoffabscheidung)

Nasse Trennverfahren: mobile Anlage (ohne Störstoffabscheidung)

Kontingenz: 0-4, 4-8, 8-16, 16-32, 32-56

Schließen Konfiguration speichern

Abbildung 3: Konfiguration von Baustoffaufbereitungsanlagen [15]

Unter Zugriff auf die Informationen der Demontageplanung lässt sich hierzu die stoffliche Zusammensetzung der zur Aufnahme der anfallenden Bauteile und Baustoffe bereitzustellenden Transportbehältnisse, im Folgenden als „Container“ bezeichnet, bestimmen (vgl. Abbildung 4).

Konfiguration Verwertungs-Stoffgruppen

Stoffgruppen für Verwertung konfigurieren

Stoffgruppen-Nr.: 1 Mineralisches Abbruchmaterial recyclingfähig Gebäude-Nr.: 12
 Primärschlüssel: 135 Bisher definierte Stoffgruppen dieses Gebäudes

Container der Stoffgruppe
 Nr. Container/Transportmittel: 31 Container mineralische Fraktionen (rc-fähig)

Containerinhalt:

Hilfs-schlüssel	St-Nr.	Baustoff	Verwertungsart
249	1140	Sandstein	stoffliche Verwertung
252	2110	Kalkmörtel	stoffliche Verwertung

Primärschlüssel	Baustoff-Nr	Baustoff-Name	Verwertungsweg
256	2310	Stahlbeton	stoffliche Verwertung
257	2320	Kies und Splittbeton	stoffliche Verwertung
258	2420	Bimsbeton	keine Verwertung/Deponie
259	2420	Bimsbeton	stoffliche Verwertung
260	2660	Bimssteine - Vollsteine	stoffliche Verwertung
261	2710	Betonhohlblocksteine	keine Verwertung/Deponie
262	2710	Betonhohlblocksteine	stoffliche Verwertung
263	3300	Vollziegel	stoffliche Verwertung
264	3400	Lochziegel	keine Verwertung/Deponie
265	3400	Lochziegel	stoffliche Verwertung
266	3600	Dachziegel	stoffliche Verwertung
267	3700	Fliesen	keine Verwertung/Deponie
268	3700	Fliesen	stoffliche Verwertung
269	3800	Keramik	stoffliche Verwertung
270	4100	Flachglas	stoffliche Verwertung

Nächste Stoffgruppe Anderes Gebäude Schließen

Abbildung 4: Stoffstromsteuerung im Rahmen der Recyclingplanung für Gebäude [16]

In einem anschließenden Schritt wird die Entsorgungslogistik festgelegt, indem die auf der Baustelle bereitzustellenden Transportbehältnisse den verfügbaren Verwertungsoptionen zugewiesen werden. Als Ergebnis der systemgestützten Recyclingplanung ergibt sich eine Verknüpfung bauwerksbezogener Bauteil- und Baustoffinformationen mit den abfallwirtschaftlichen Rahmendaten des regionalen Umfeldes. Abbildung 5 verdeutlicht ein derartiges regionalisiertes Verwertungskonzept für ein Wohngebäude.

Baustoff Nr.	Baustoff	Masse (kg)	EWC-Nr.	Stoffgruppe	Cont-Nr.	Einzusetzender Containertyp/ Bezeichnung	Verwertungsoption/ Entfernung [km]						
							V1	V2	V3	V4	V5		
1120	Granit	550	17 05 01	Mineralisches Abbruchmaterial recyclingfähig (Mtr)	31	Abrollmulde 15 m³ Mineralische Fraktionen recyclingfähig	V1	V2	V3	V4	V5		
1140	Sandstein	1.032.484	17 05 01				100	15	100				
2110	Kalkmörtel	220.824	17 01 00										
2130	Zementmörtel	523	17 01 00										
2710	Betonhohlblocksteine	8843	17 01 01										
3300	Vollziegel	206.339	17 01 02										
3700	Fliesen	2.020	17 01 03										
3800	Keramik	45	17 01 03										
3900	Porzellan	231	17 01 03										
1610	Steinkohlenschlacke	33.918					Mineralisches Abbruchmaterial nicht recyclingfähig (Mtr)	32	Abrollmulde 15 m³ Mineralische Fraktionen nicht recyclingfähig	V15			
2210	Gipsmörtel	55.041	17 01 04	16									
3600	Dachziegel	21.892	17 01 02	Dachziegel (Zi)	30	Abrollmulde 15 m³ Dachziegel	V2	V4	V4	V6	V9		
6310	Fichte/Tanne/Kiefer behandelt	9.531	17 02 01	behandeltes Holz (Hb)	24	Abrollmulde 15 m³ Holz behandelt	V7	V8	V9	V10	V11		
6500	Holzspanplatten	6	17 02 01				20	50	60	40	70		
6300	Fichte/Tanne/Kiefer	78.328	17 02 01	unbehandeltes Holz (Hu)	25	Abrollmulde 30 m³ Holz unbehandelt	V7	V8	V9	V10	V11		
5100	Guß Eisen	1.423	17 04 05	Eisenmetalle (E)	27	Absetzmulde 10 m³ Metalle	20	50	60	40	70		
5200	Stahl	1.033	17 04 05				V9	V10	V11	V13	V14		
5600	Zink	261	17 04 04	Nichteisenmetalle (NE) Kabelreste und Elektronikschrott (Ka)	35	Absetzmulde 10 m³ Metalle (zur Wiederverwertung)	60	40	70	10	30		
10100	Kabel	77	17 04 08							V9	V10	V14	V16
10000	Elektronikschrott	121	17 04 07/08		28	Minicontainer 1 cm³ Elektronikschrott	V9	V10	V11	V14	V16		
4100	Flachglas	93	17 02 02	Glas (Gl)	26	Abrollmulde 20 m³ Glas	60	40	70	30	45		
6730	Pappe	216		Papier, Karton	34	Absetzmulde 5 m³ Papier und Karton	D1	D2	D3				
7730	Tapete, bedruckt	131					10	>100	45				
7430	PVC hart	42	17 02 03	Plastik (Ku)	29	Minicontainer 1 cm³ Plastik	V9	V10	V11	V17			
7300	Polystyrol	18	17 02 03				60	40	70	15			
7460	PVC weich	348	17 02 03	Restmüll (R)	33	Abrollmulde 20 m³ Restmüll	D1	D2	D3				
6660	Holzfasern	85	17 02 01				10	>100	45				
Rückbaubjekt		EWC		regionale Abfallwirtschaftspläne	Transportunternehmen		regionale Rahmendaten						
Datenherkunft													

Abbildung 5: Regionalisiertes Verwertungskonzept für ein Wohngebäude [16]

Untersuchungen zeigen, dass durch integrierte Demontage- und Recyclingplanung Sekundärbaustoffe hoher Qualität erzeugt werden können [15]. Hierzu sind Demontage und Aufbereitung gezielt aufeinander abzustimmen. Ein Schlüsselfaktor besteht dabei in der Koppelung der Stör- und Schadstoffausschleusung im Rahmen der Gebäudedemontage und der nachgeschalteten Baustoffaufbereitung. Als wesentlicher Kernpunkt hat sich dabei etwa herauskristallisiert, dass rußbelastete Bauteile - im Wesentlichen Kamine - sowie gipshaltige Bestandteile bereits bei der Gebäudedemontage von den restlichen Stoffgruppen zu separieren und getrennten Verwertungswegen zuzuführen sind. Es konnten beispielsweise konkrete Maßnahmen zur deutlichen Reduzierung der hohen Konzentrationen an polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen sowie eine Verminderung des Sulfatgehaltes aufgezeigt werden [12], [15].

5 Modellierung des Rückbaus von Bauwerken als Projektplanungsproblem

Die in der Praxis eingesetzten Projektplanungsverfahren der Baustellenfertigung basieren im Wesentlichen auf den bekannten Ansätzen der Zeit- und Terminplanung. Diese wurden teilweise für spezifische Aspekte der Baustellenfertigung weiterentwickelt. In diesem Zusammenhang sind insbesondere Methoden zur Visualisierung von Bauabläufen wie etwa spezielle Linien- oder Zyklusdiagramme zu nennen (vgl. [1]). Ansätze zur simultanen Betrachtung unterschiedlicher Fertigungsstrategien unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Kapazitäts- bzw. Ressourcenbeschränkungen werden jedoch für die Baustellenfertigung bislang kaum eingesetzt. Die in der Praxis etablierten Verfahren der Baustellenplanung zielen vorwiegend darauf ab, zulässige, Ablaufpläne, jedoch unter weitgehender Vernachlässigung einer simultanen Berücksichtigung von Kapazitätsrestriktionen, zu erzeugen. Im Hinblick auf die nachfolgend dargestellten Verfahren zur Ermittlung optimaler, kapazitatierter Ablaufpläne, eignen sich diese Verfahren als Vorstufe, etwa zur Berechnung von Zeitfenstern für einzelne Vorgänge.

Die Termin- und Kapazitätsplanung bei Einzel- oder Auftragsfertigung, denen sich im weiteren Sinne auch der Gebäuderückbau zuordnen lässt, wird in der Betriebswirtschaftslehre auch als *Projektplanung* bezeichnet. Die Projektplanung bildet neben der Projektsteuerung und -kontrolle eine zentrale Aufgabe im Rahmen des Projektmanagements [5]. Zur Projektplanung wurden in den letzten Jahren spezielle Verfahren entwickelt. Ein Spezialgebiet der Projektplanung sind kapazitäts- bzw. ressourcenbeschränkte Projektplanungsmodelle. Diese werden seit einigen Jahren in der quantitativen Betriebswirtschaftslehre verstärkt zur Modellierung der Termin- und Kapazitätsplanung bei Einzelfertigung eingesetzt. Die auf erweiterte Ansätze der Netzplantechnik zurückzuführenden Modelle wurden bereits im Jahre 1973 von Patterson vorgestellt [8]. Zielsetzung der ressourcenbeschränkten Projektplanung ist die Ermittlung optimaler Ablaufpläne unter Berücksichtigung von Kapazitäts- oder Ressourcenbeschränkungen. Darüber hinaus ist es prinzipiell auch möglich, mehrere alternativ ausführbare Varianten einzelner Vorgänge zu berücksichtigen. Ressourcenbeschränkte Projektplanungsprobleme erscheinen damit grundsätzlich geeignet, die wesentlichen Anforderungen an eine operative Rückbauplanung zu erfüllen, und werden daher im Folgenden zur Modellierung herangezogen.

Ressourcenbeschränkte Projektplanungsmodelle ermitteln auf Basis eines vorgegebenen, topologisch sortierten¹⁰ Netzplans, der die zwingenden Reihenfolgerelationen der einzelnen Arbeitsvorgänge j ($j=1, \dots, J$) (im Folgenden auch als *Aktivitäten* oder *Demontagegruppen*

¹⁰ Dies impliziert unter anderem, dass das Netzwerk keine Zyklen aufweist..

bezeichnet) auf der Baustelle vorgibt, einen zulässigen, bzw. in Abhängigkeit der gewählten Zielfunktion, einen zeit- oder kostenminimalen Ablaufplan. Beim Rückbau von Gebäuden ergeben sich als Vorgänge im Sinne der obigen Definition sogenannte Demontagegruppen (vgl. [22]). Der Rückbau eines Bauwerkes besteht dann aus einer (festen) Anzahl J derartiger Demontagegruppen, die jeweils einen Knoten des Netzplanes bilden. Der Demontagenetzplan ist so zu gestalten, dass er genau einen Startknoten (Quelle) und genau einen Zielknoten (Senke) enthält. Dabei können die einzelnen Vorgänge bzw. Demontagegruppen j in der Regel mit unterschiedlichen Varianten (Modi) m ($m=1, \dots, M_j$) realisiert werden. Zur Sicherstellung eines effizienten Bauablaufs können beispielsweise eine Vielzahl alternativer Demontagetechniken auf der Baustelle zum Einsatz kommen. Dementsprechend müssen bei der Modellformulierung sogenannte Time-Resource- bzw. Resource-Resource Tradeoffs berücksichtigt werden. Hinsichtlich der einsetzbaren Ressourcen lassen sich erneuerbare, nicht erneuerbare und doppelt beschränkte Ressourcen unterscheiden. *Erneuerbare* Ressourcen stehen jede Periode erneut in einer bestimmten Menge zur Verfügung, sind also nur innerhalb einer Zeitperiode beschränkt. *Nicht erneuerbare* Ressourcen sind in Bezug auf die gesamte Projektdauer beschränkt. *Doppelt beschränkte* Ressourcen sind sowohl in jeder Periode als auch über die gesamte Projektdauer hinweg beschränkt. Da sich jede doppelt beschränkte Ressourcen formal als eine erneuerbare und eine nicht erneuerbare Ressource darstellen lässt (vgl. [27]), brauchen doppelt beschränkte Ressourcen im Weiteren nicht explizit berücksichtigt werden. Zur formalen Beschreibung der Ressourcen reichen demnach die Mengen R für die erneuerbaren Ressourcen und N für die nicht erneuerbaren Ressourcen aus.

Das sich ergebende Planungsproblem kann unter der Zielsetzung der möglichst schnellen Baustellenbeendigung dann wie folgt formuliert werden:¹¹

$$\text{MIN} \quad CT = \sum_{j=1}^{M_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} t \cdot x_{jmt} \quad (1)$$

$$\text{u.d.N.} \quad \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} x_{jmt} = 1 \quad j = 1, \dots, J \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^{M_i} \sum_{t=EF_i}^{LF_i} t \cdot x_{imt} \leq \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} (t - d_{jm}) \cdot x_{jmt} \quad j = 2, \dots, J, i \in P_j \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{\tau=t}^{t+d_{jm}-1} q_{jmr(d_{jm}-\tau+t)} \cdot x_{jm\tau} \leq Q_{rt} \quad r \in R, t = 1, \dots, \bar{T} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^{M_j} q_{jmn} \sum_{\tau=EF_j}^{LF_j} x_{jm\tau} \leq Q_n \quad n \in N \quad (5)$$

$$x_{jmt} \in \{0,1\} \quad j = 1, \dots, J, m = 1, \dots, M_j, t = EF_j, \dots, LF_j \quad (6)$$

mit folgender Notation:

¹¹ Für eine ausführliche Beschreibung der Modellvoraussetzungen sei auf [16] verwiesen.

j :	Demontagegruppe mit $j \in (1, \dots, J)$, wobei 1 = (einzige) Quelle und J = (einzige) Senke,
LF_j (EF_j):	Spätester (frühester) Endtermin der Demontagegruppe j ; $LF_J = \bar{T}$,
CT_j :	Endtermin der Demontagegruppe j ,
P_j :	Menge der direkten Vorgänger der Demontagegruppe j ,
d_{jm} :	Dauer der Demontagegruppe j im Modus m ; $d_{1m} = d_{Jm} = 0$,
x_{jmt} :	$\begin{cases} 1, & \text{falls die Bearbeitung von Demontagegruppe } j \text{ in Periode } t \text{ beendet wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$,
q_{jmn} (q_{jmr}):	Nachfrage nach der nicht erneuerbaren (erneuerbaren) Ressource n , $n \in N$ (r , $r \in R$) von Demontagegruppe j im Modus m (in Periode t),
Q_n :	Zur Verfügung stehende Kapazität der nicht erneuerbaren Ressource n , $n \in N$,
Q_r :	Zur Verfügung stehende Kapazität der erneuerbaren Ressource r , $r \in R$ in Periode t , $1 \leq t \leq \bar{T}$,
$r(n)$:	Erneuerbare (nicht erneuerbare) Ressource, $r \in R$ ($n \in N$),
\bar{T} :	Obere Grenze der Baustellendauer; $\bar{T} = \sum_{j=1}^J \max_{m=1}^{M_j} \{ d_{jm} \}$

Das Planungsmodell (1)...(6) verfolgt das Ziel einer zeitlichen Einplanung aller Vorgänge unter gleichzeitiger Berücksichtigung der beschränkten Verfügbarkeit der eingesetzten Ressourcen. Es handelt sich damit um eine integrierte Termin- und Kapazitätsplanung.

Bei dem hier dargestellten Modell minimiert die Zielfunktion (1) den Projektendtermin. Da es nur genau einen Endvorgang gibt und dieser mit seinem Beendigungszeitpunkt gewichtet wird, stellt Gleichung (1) tatsächlich die Projekt- bzw. Baustellendauer dar. Die Modellierung alternativer Zielsetzungen im Bereich der Baustellenplanung, etwa zur Ressourcennivellierung oder zur Kostenminimierung, werden in [16] vorgestellt. Nebenbedingungen (2) gewährleisten, dass jede Demontagegruppe nur innerhalb der sich aus den Vorgangsbeziehungen (3) ergebenden zulässigen Zeit ausgeführt wird. Nebenbedingungen (4) und (5) stellen die Berücksichtigung von Ressourcenbeschränkungen sicher.

Verschiedene Erweiterungen und Anpassungen des Modells im Hinblick auf bauablaufrelevante Fragestellungen wie

- die Unterbrechbarkeit von Demontagevorgängen,
- die Einbeziehung kontinuierlicher Ressourcen,
- die Berücksichtigung definierter Fertigstellungszeitpunkte,
- die Ausnutzung spezieller Netzwerkstrukturen
- die Bestimmung zulässiger Vorgangszeiten, oder
- die gleichzeitige Ressourceninanspruchnahme von mehreren Vorgängen

finden sich in [16].

Zur Lösung des aufgestellten Modells wurden eine Reihe heuristischer sowie exakter Verfahren vorgeschlagen (vgl. etwa [2], [3]). Zur Berücksichtigung spezieller Probleme bei der Baustellenfertigung, wie der gemeinsamen Benutzung einer Ressource durch mehrere Gewerke bzw. Demontagegruppen, wurde ein von Sprecher [26] konzipiertes Lösungs-

verfahren modifiziert und anschließend zur Lösung von Demontageproblemen im Baubereich angewandt (vgl. [16])¹². Auf die hierbei erzielten Ergebnisse wird im Folgenden eingegangen.

6 Anwendung des Planungsmodells auf verschiedene Bauwerke

Die Basis der nachfolgenden Berechnungen bilden zahlreiche Rückbauprojekte, die in der Praxis in Form von Pilotbaustellen durchgeführt und wissenschaftlich ausgewertet wurden. Die hierbei gewonnenen Erfahrungen, insbesondere das umfangreiche Datenmaterial über Demontagezeiten, Rückbautechniken und Ressourcenbedarfe wurde ausführlich dokumentiert (vgl. etwa [9], [10], [11], [13]).

Auf Basis des Planungsmodells (1)...(6) lassen sich die Gesamtkosten eines Gebäuderückbaus in Abhängigkeit unterschiedlicher Entsorgungs-, Personal- und Betriebsmittelkosten bereits im Planungsstadium bestimmen und konkrete Maßnahmen zur Kostenreduzierung aufzeigen.¹³ Darüber hinaus lässt sich der Einfluss der Demontagetiefe auf Demontage- und Verwertungskosten sowie Verwertungsquoten bestimmen. Nachfolgend werden exemplarisch einige Kostensenkungspotenziale für Rückbaumaßnahmen aufgeführt und quantifiziert.

Aufgrund hoher Personal- und Gerätekosten ist zu erwarten, dass mit zunehmendem Demontageumfang oder mit dem Einsatz spezieller Demontagetechniken eine Erhöhung der Demontagekosten zu verzeichnen ist. Demgegenüber stehen verringerte Kosten der Verwertung, da mit zunehmender Demontagetiefe eine höhere Sortenreinheit der beim Rückbau gewonnenen Materialien zu verzeichnen ist. Führt diese erhöhte Sortenreinheit zu einem verminderten Anteil von Abfällen zur Beseitigung, spiegelt sich eine zunehmende Demontagetiefe auch in einer Erhöhung der Verwertungsquote wider. Einhergehend mit einer **Variation der Demontagetiefe** ist zudem eine Veränderung der Baustellendauer. Diese Zusammenhänge wurden im Rahmen von Modellrechnungen sowie durch Pilotprojekte in der Praxis bestätigt (vgl. Abbildung 6; Demontagetiefe 1 bedeutet dabei den Abbruch¹⁴, Demontagetiefe 7 entspricht dem vollständigen Rückbau des Gebäudes).¹⁵

¹² Eine Beschreibung des hierzu entwickelten Softwaresystems findet sich in [16].

¹³ Bei den nachfolgenden Berechnungen kommen ausschließlich erneuerbare Ressourcen zum Einsatz, daher findet Modellrestriktion (5) keine Anwendung.

¹⁴ Dem eigentlichen Abbruch geht dabei die Entfernung toxischer sowie umweltgefährdender Stoffe (z. B. asbesthaltiger Bauteile) voraus.

¹⁵ Die unterschiedlichen Strategien basieren demgemäß jeweils auf verschiedene Demontagenetzwerke. Die zugrundeliegenden Annahmen (Vorgänge, Reihenfolgerestriktionen, Demontagetechniken, Kostensätze, Personal- und Geräteeinsatz etc.) finden sich in [16].

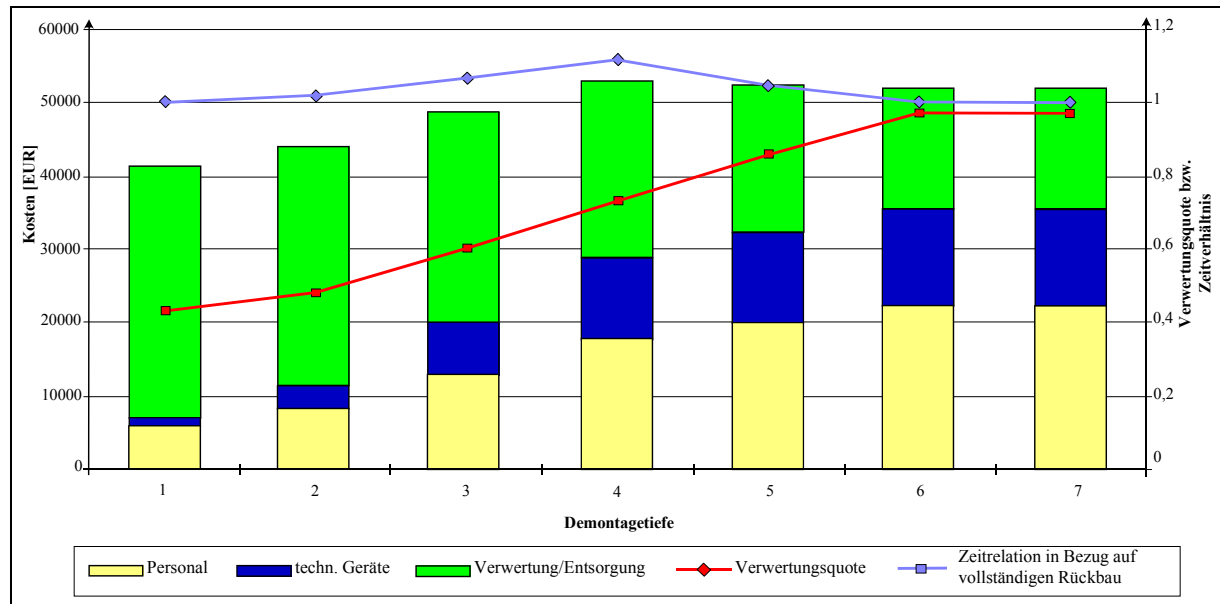


Abbildung 6: Kosten, Zeitbedarf und Verwertungsquoten beim Rückbau für unterschiedliche Demontagetiefen (Ergebnisse von Optimierungsrechnungen)

Im Rahmen umfangreicher Modellrechnungen konnte gezeigt werden, dass sich in Regionen mit niedrigen Personalkostensätzen der Rückbau bereits jetzt für eine Vielzahl von Gebäudetypen als wirtschaftlich vorteilhaft herausstellen kann. Ein hohes Lohnniveau sowie der Einsatz kostenintensiver Geräte auf der Baustelle führt demgegenüber zu einer geringeren Demontagetiefe. Der vollständige Rückbau ist dann aufgrund der hohen Personalintensität unter ökonomischen Gesichtspunkten nicht mehr vorteilhaft, so dass kaum Demontage auf der Baustelle erfolgt.

Ergänzend zu einer Variation der Demontagetiefe lassen sich die Rückbaukosten durch die **Wahl der eingesetzten Demontage- bzw. Abbruchtechniken** gezielt beeinflussen. Dabei muss jedoch einschränkend angemerkt werden, dass die Anwendung innovativer Techniken zur Stofftrennung auf der Baustelle wie etwa die Verbundstofftrennung mittels kryogener Verfahren zwar technisch möglich, derzeit jedoch in der Regel noch mit einem ökonomisch unverhältnismäßig hohem Aufwand verbunden ist (vgl. [25]). Es zeigt sich, dass eine strenge Stofftrennung sowie ein Austrag belasteter Flächen auf der Baustelle zunächst mit erheblichen Mehrkosten bei der Demontage verbunden ist. Durch die Wahl zeit- und kosteneffizienter Demontagemaßnahmen sowie deren ablauforganisatorisch optimaler Ausgestaltung ergeben sich jedoch beachtliche Kostensenkungspotenziale (vgl. [15]).

Sind die mit dem Rückbau von Gebäuden zu erreichenden Qualitätsziele vorgegeben, etwa in Form einzuhaltender Grenzwerte für bestimmte Baustoffe, stellt sich die Frage nach der Umsetzung dieser Zielvorgaben im Rahmen des *Baustellenmanagements*. Zur Untersuchung der sich daraus ergebenden betriebswirtschaftlichen Fragestellungen lassen sich wiederum auf Basis des Planungsmodells (1)...(6) zeit- und kostenminimale Rückbauvarianten berechnen.¹⁶

Unter Einhaltung definierter Qualitätsanforderungen an die bei der Demontage gewonnenen Baustoffe¹⁷ wurden *stoffflussbasierte Termin- und Kapazitätsplanungen* für verschiedene

¹⁶ Auf die Berechnung kostenminimaler Ablaufpläne wird hier verzichtet. Vgl. dazu [16].

¹⁷ Die Beeinflussung der Qualität von Recyclingbaustoffen durch Demontagemaßnahmen auf der Baustelle sowie durch nachgeschaltete Aufbereitung wurde in [12] und [15] untersucht.

Demontageszenarien und unterschiedliche Baustellenbedingungen vorgenommen. Es zeigt sich, dass sich durch die Wahl zeit- und kosteneffizienter Demontagemaßnahmen sowie deren ablauforganisatorisch optimaler Ausgestaltung beachtliche Kostensenkungspotenziale ergeben. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die ökonomischen **Auswirkungen unterschiedlicher Demontagesstrategien** für den vollständigen Rückbau eines Wohngebäudes auf.¹⁸

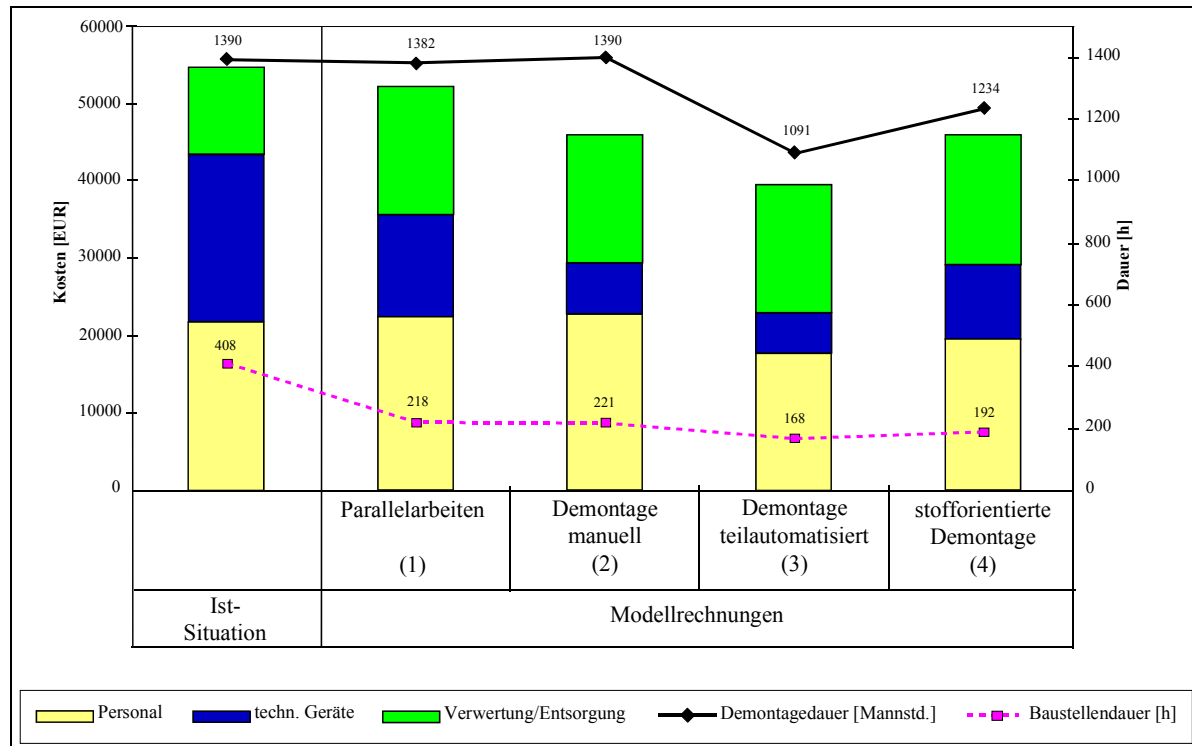


Abbildung 7: Kosten und Zeitbedarf unterschiedlicher Demontageszenarien für den Rückbau eines Wohngebäudes

Im dargestellten Beispiel resultiert aus der konsequenten Ausnutzung parallel einplanbarer Demontagegruppen (1) gegenüber den bislang in der Praxis realisierten Vorgehensweisen eine Verkürzung der Baustellendauer um 47 %. Bei vergleichbarer Personal- und Betriebsmittelkapazität lässt sich eine Zeitersparnis von ca. 30 bis 50 % erzielen. Der Zeitbedarf für eine optimierte Gebäudedemontage unter Einsatz teilautomatisierter Betriebsmittel (3) liegt für dieses Gebäude damit in der gleichen Größenordnung wie beim konventionellen Abbruch. Werden die Entsorgungskosten für die beim Rückbau anfallenden Baustoffe zudem hinreichend nach deren Qualität (Vermischungsgrad, Umweltverträglichkeit) gestaffelt (4), erweist sich eine strenge Materialseparierung unter Einsatz spezieller Rückbautechniken, hier als „stofforientierte Demontage“ bezeichnet, nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch vorteilhaft. Erreicht wird dies unter anderem auch durch effizientere Baustellenlogistik sowie eine auf den Rückbauablauf optimal abgestimmte Einplanung von Personal und Betriebsmitteln.

Liegt die für den Rückbau eines Gebäudes einzuschlagende Demontagesstrategie fest, kann unter Einbeziehung kurzfristig beeinflussbarer Parameter wie etwa der täglichen Verfügbarkeit von Arbeitskräften oder Maschinen eine **operative Baustellenplanung** vorgenommen werden. In Anlehnung an die aus dem Bereich der Produktionsplanung

¹⁸ Zur Definition der hierbei zugrundeliegenden Szenarien vgl. [16]. Die Ist-Situation bezieht sich dabei auf ein Pilotprojekt in der Praxis [11].

bekanntem Konzept erlaubt die Anwendung von Projektplanungsmodellen hierbei eine bedarfszeitpunktorientierte Einsatzplanung für die zum Rückbau benötigten Ressourcen. Abbildung 8 verdeutlicht exemplarisch den Einsatz von Arbeitskräften auf der Baustelle, wobei davon ausgegangen wird, dass die insgesamt auf der Baustelle verfügbare Anzahl an Arbeitskräften limitiert ist. Im dargestellten Beispiel wird angenommen, dass lediglich zehn Arbeitskräfte gleichzeitig zur Verfügung stehen. Beim Vorliegen dieser Situation sind für die Bestimmung der Optimallösung nicht nur die Reihenfolgerelationen der Demontagegruppen zu beachten. Zusätzlich muss gewährleistet werden, dass die zulässige Gesamtkapazität von zehn Arbeitskräften in keiner Periode überschritten wird.

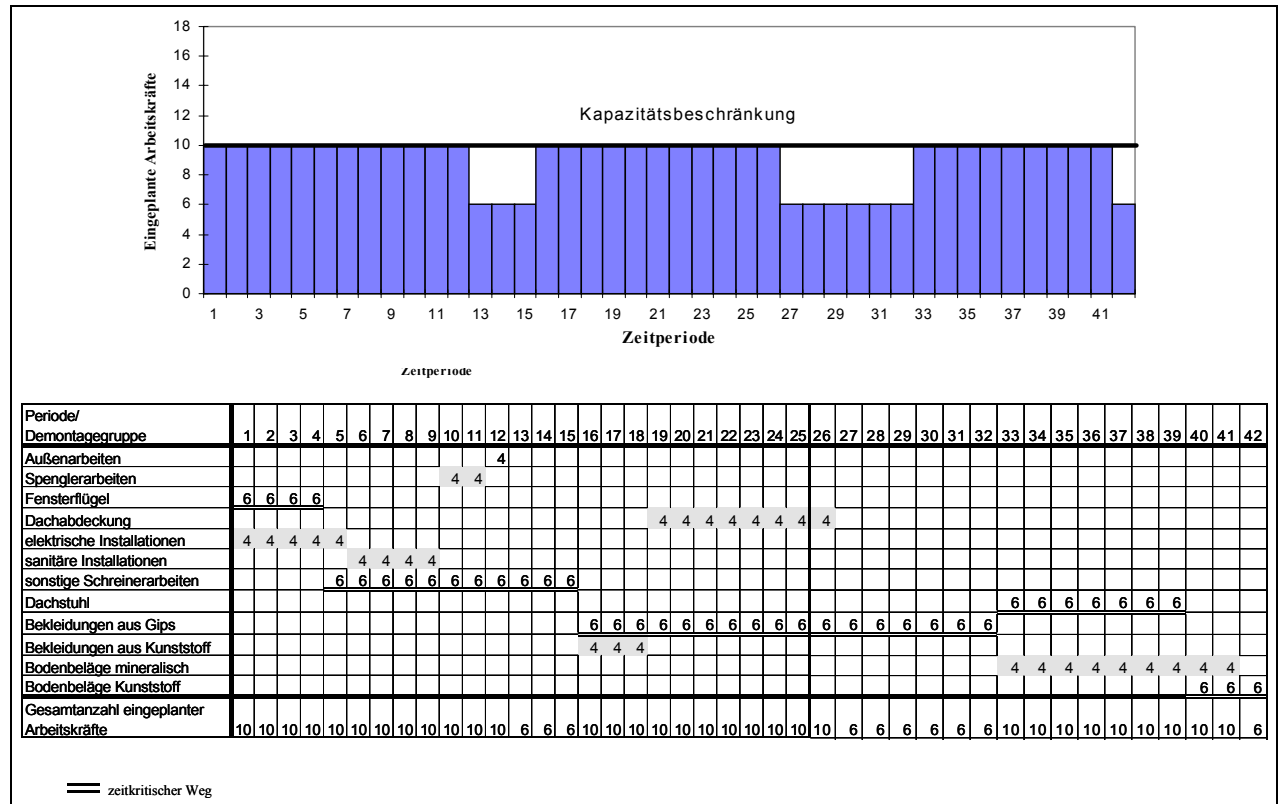


Abbildung 8: Kapazitätsbelastungsprofil der Arbeitskräfte beim Rückbau eines Wohngebäudes

Abbildung 9 verdeutlicht auf stark aggregierter Ebene die sich unter Berücksichtigung von Kapazitätsbeschränkungen ergebende optimale zeitliche Abfolge der einzelnen Arbeitsvorgänge (Demontagegruppen) auf der Baustelle für unterschiedliche Demontagestrategien sowie die zugehörigen Kostenverläufe [21].

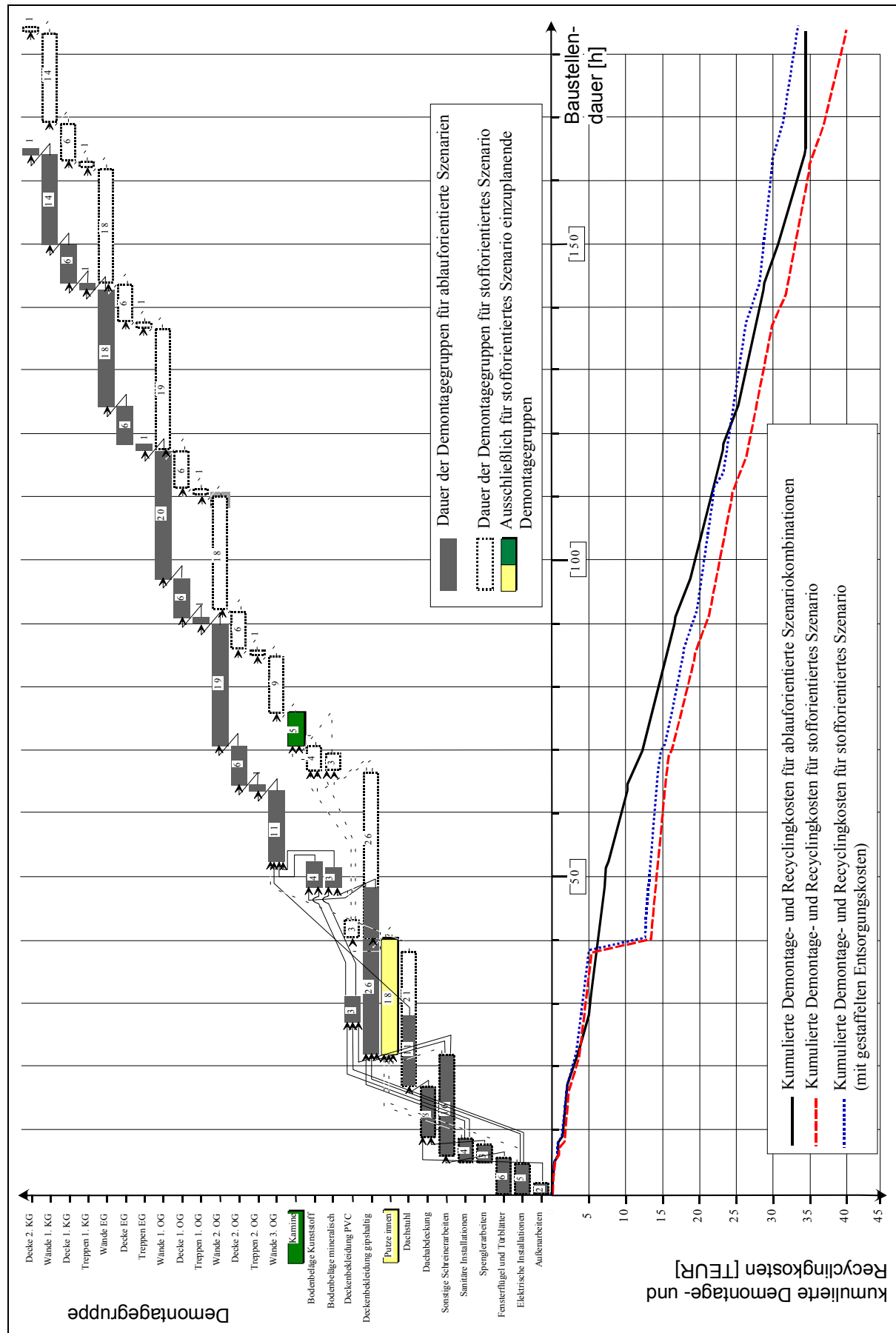


Abbildung 9: Gantt-Diagramm und Projektkosten für unterschiedliche Demontage- und Verwertungsszenarien beim Rückbau eines Wohngebäudes

Abbildung 10 fasst die Ergebnisse der auf Basis ressourcenbeschränkter Projektplanungsmodelle für den Rückbau eines Wohngebäudes erzielten Ergebnisse zusammen. Es ist zu erkennen, dass sich durch die Anwendung von Projektplanungsmethoden erhebliche Verbesserungspotenziale im Vergleich zur derzeit praktizierten Vorgehensweise erreichen lassen.

Optimierungsergebnisse zeigen darüber hinaus, dass durch Anwendung innovativer Ansätze wie etwa *fertigungssynchroner Ressourceneinsatzplanung* auf der Baustelle, ein umweltfreundlicher Rückbau auch unter *strengen Zeitvorgaben* sowie bei extrem *begrenzten Platzverhältnissen* wirtschaftlich durchgeführt werden kann [16]. Aufbauend auf diesen Ergebnissen lassen sich unter anderem neue Ansätze für *Baustellenlogistikkonzepte* entwickeln [18].

		Kosten						Zeit			
		Demontage		Verwertung		Gesamt		Baustellendauer		Demontagedauer	
		[EUR]	Δ [%]	[EUR]	Δ [%]	[EUR]	Δ [%]	[h]	Δ [%]	[Mannstd.]	Δ [%]
Ist-Situation		44378	0	11593	0	55971	0	408	0	1390	0
Vollständiger Rückbau / unterschiedliche Demontageszenarien											
Szenario											
Nr.	Bezeichnung										
1	Parallelarbeiten	36535	-17,7	16906	45,8	53441	-4,5	218	-46,6	1382	-0,6
2	manuelle Demontage	30110	-32,2	16913	45,9	47023	-16,0	221	-45,8	1398	0,6
3	teilautomatisierte Demontage	23576	-46,9	16910	45,9	40486	-27,7	168	-58,8	1091	-21,5
4	stofforientierte Demontage	29942	-32,5	17094	47,5	47036	-16,0	192	-52,9	1234	-11,2
4a	stofforientierte Demontage + stark gestaffelte Entsorgungskosten	29942	-32,5	6734	-41,9	36676	-34,5	192	-52,9	1234	-11,2
Vollständiger Rückbau / Feinterminierung bei unterschiedlichen Baustellenbedingungen											
Platzbeschränkung auf der Baustelle											
1-3	gering	18188	-59,0	16910	45,9	35098	-37,3	163	-60,0		
1-3	hoch	18233	-58,9	16910	45,9	35143	-37,2	167	-59,1		
4a	gering	27415	-38,2	6734	-41,9	34149	-39,0	182	-55,4		
4a	hoch	27702	-37,6	6734	-41,9	34436	-38,5	186	-54,4		
Kombination Rückbau / Abbruch bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen											
Demontage-tiefe		Kostenniveau							Verwertungs- quote		
		Verwertung	Personal								
3	gering	gering	gering	19091	-57,0	23767	105,0	42858	-23,4	43%	
3	gering	hoch	gering	19104	-57,0	30225	160,7	49329	-11,9	43%	
3	gering	gering	hoch	24665	-44,4	23744	104,8	48409	-13,5	43%	
3	gering	hoch	hoch	24651	-44,5	30234	160,8	54885	-1,9	43%	
3	hoch	gering	gering	23325	-47,4	18324	58,1	41649	-25,6	97%	
3	hoch	hoch	gering	23339	-47,4	23356	101,5	46695	-16,6	97%	
3	hoch	gering	hoch	41329	-6,9	18321	58,0	59650	6,6	97%	
3	hoch	hoch	hoch	41316	-6,9	23360	101,5	64676	15,6	97%	

Abbildung 10: Zusammenfassende Ergebnisse der Rückbauplanung für ein Wohngebäude

7 Ausblick

Eine Anwendung der entwickelten Systeme zur Demontage- sowie zur Ablaufplanung auf reale Gebäude zeigt zunächst, dass sich durch Kombination von Gebäuderückbau und nachgeschalteter Aufbereitungstechnik eine deutliche Qualitätsverbesserung von Recyclingbaustoffen erzielen lässt. Zur Umsetzung der hierzu erforderlichen Maßnahmen sind unter Berücksichtigung individueller abfallwirtschaftlicher Rahmenbedingungen der jeweiligen Planungsregion, gebäude- und baustellenbezogener Besonderheiten, technischer sowie kapazitiver Restriktionen detaillierte Ablaufpläne für den Gebäuderückbau zu berechnen.

Zur Erreichung dieser Verbesserungspotenziale kann die Anwendung von Projektplanungsmodellen und -methoden einen entscheidenden Beitrag leisten. Auf Basis der vorgestellten Methodik kann beispielsweise auch eine *Just-in-Time-Steuerung* für die auf der Baustelle benötigten Betriebsmittel konzipiert werden. Hierdurch kann eine zeiteffiziente Gebäudedemontage mit sortenreiner Materialerfassung auch bei beschränkten Platzverhältnissen, etwa in innerstädtischen Gebieten erfolgen. Allerdings ist hiermit ein hoher Planungsaufwand erforderlich, der die Bereitstellung umfangreicher Planungsdaten einschließt.

Im Hinblick auf die in der Realsituation anzutreffenden Störungen im Bauablauf muss daher kritisch hinterfragt werden, ob derart detaillierte Lösungen in der Planungsphase erforderlich sind. In jedem Fall sind die berechneten Planungsergebnisse bei der Realisierung durch kurzfristige Anpassungsmaßnahmen im Rahmen der Produktions- bzw. Projektsteuerung auf der Baustelle zu ergänzen. Zudem ist die Bereitstellung der für die Modellierung erforderlichen Plandaten in der Praxis kritisch zu prüfen. Auch hier können methodische Hilfestellungen, etwa die Abbildung von Unschärfen durch Fuzzy-Entscheidungsmodelle bei der Planung herangezogen werden (vgl. [23], [24]).

Literatur

- [1] Brandenberger, J.; Ruosch, E. (1993): *Ablaufplanung im Bauwesen*, 3. Aufl., Baufachverlag, Dietikon
- [2] Brucker, P.; Drexl, A.; Möhring, R.; Neumann, K.; Pesch, E. (1999): *Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods*, in: *European Journal of Operational Research* 112 (1999) 1, S. 3-41
- [3] Demeulemeester, E.; Herroelen, W. (2002): *Project Scheduling – A Research Handbook*, Kluwer, Boston, Dordrecht, London
- [4] Drexl, A.; Fleischmann, B.; Günther, H. O.; Stadler, H.; Tempelmeier, H. (1994): *Konzeptionelle Grundlagen kapazitätsorientierter PPS-Systeme*, in: *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 49 (1994), S. 1022-1045
- [5] Drexl, A.; Kolisch, R.; Sprecher, A. (1997): *Neuere Entwicklungen in der Projektplanung*, in: *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 2 (1997), S. 95-120
- [6] Kreislaufwirtschaftsträger Bau e.V. (Hrsg.) (2002): *Monitoring-Bericht Bauabfälle*, Berlin, Düsseldorf, Duisburg
- [7] Meredith, J. R.; Mantel S. J. (2003): *Project management - A managerial approach*, Fifth Edition, John Wiley & Sons, New York
- [8] Patterson, J. H. (1973): *Alternate methods of project scheduling with limited resources*, in: *Naval Research Logistics Quarterly* 20 (1973), S. 767-784
- [9] Pitzini-Duée, B.; Schultmann, F.; Zundel, T.; Rentz, O. (1999): *Audit et déconstruction sélective d'un bâtiment: une opération rentable*, in: *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, n° 2, avril, Paris, S. 31 - 40
- [10] Rentz, O.; Ruch, M.; Nicolai, M.; Spengler, T.; Schultmann, F. (1994): *Selektiver Rückbau und Recycling von Gebäuden*, Ecomed Verlag, Landsberg
- [11] Rentz, O.; Ruch, M.; Schultmann, F.; Sindt, V.; Zundel, T.; Charlot-Valdieu, C.; Vimond, E. (1998): *Selektiver Gebäuderückbau und konventioneller Abbruch -*

- Technisch-wirtschaftliche Analyse eines Pilotprojektes*, Ecomed Verlag, Landsberg
- [12] Rentz, O.; Schultmann, F.; Ruch, M.; Sindt, V. (1997): *Demontage und Recycling von Gebäuden, Entwicklung von Demontage- und Verwertungskonzepten unter besonderer Berücksichtigung der Umweltverträglichkeit*, Ecomed Verlag, Landsberg
- [13] Rentz, O.; Schultmann, F.; Seemann, A. (1998): *Rückbau des staatlichen Aufbaugymnasiums Rottweil - Gebäudeauditierung, Rückbau- und Verwertungsplanung*, Forschungsbericht im Auftrag des Landes Baden-Württemberg/Staatliches Vermögens- und Bauamt Rottweil, Karlsruhe
- [14] Rentz, O.; Seemann, A.; Schultmann, F. (2001): *Abbruch von Wohn- und Verwaltungsgebäuden – Handlungshilfe*, Endbericht zum gleichnamigen Projekt im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 17 S., erschienen unter: Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.): Reihe „Kreislaufwirtschaft und Abfallbehandlung“, Nr. 17
- [15] Rentz, O.; Seemann, A.; Raess, C.; Schultmann, F. (2003): *Entwicklung optimierter Rückbau- und Recyclingverfahren durch Kopplung von Gebäudedemontage und Baustoffaufbereitung*, Endbericht des gleichnamigen Forschungsvorhabens im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
- [16] Schultmann, F. (1998): *Kreislaufführung von Baustoffen - Stoffflußbasiertes Projektmanagement für die operative Demontage- und Recyclingplanung von Gebäuden*, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- [17] Schultmann, F.; Pitzini-Duée, B.; Zundel, T.; Rentz, O. (1998): *Développement d'un logiciel d'audit de bâtiment avant démolition*, in: Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, n° 2, avril, Paris, S. 41-50
- [18] Schultmann, F.; Rentz, O. (1999): *Logistikmanagement auf Basis kapazitätsbeschränkter Projektplanungsmodelle - dargestellt am Beispiel der Baustellenfertigung*, in: Kopfer, H.; Bierwirth, C. (Hrsg.): *Logistik Management: Intelligente I+K Technologien*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 51-60
- [19] Schultmann, F.; Rentz, O. (1999): *Stoffstrommanagement für Baureststoffe aus dem Hochbau - Methodische Planung der Auditierung, des selektiven Rückbaus und des Recyclings von Gebäuden*, in: Müll und Abfall, 4, S. 206-217
- [20] Schultmann, F.; Rentz, O. (2000): *The State of Deconstruction in Germany*, in: Kibert, C. J.; Chini, A. R. (Ed.): *Overview of Deconstruction in Selected Countries*, CIB Report, Publication 252, Rotterdam, S. 45-74
- [21] Schultmann, F.; Rentz, O.: *Environment-oriented project scheduling for the dismantling of buildings*, in: OR Spektrum 23 (2001) 1, S. 51-78
- [22] Schultmann, F.; Rentz, O.: *Scheduling of deconstruction projects under resource constraints*, in: *Construction Management and Economics* 20 (2002) 5, S. 391-401
- [23] Schultmann, F.; Rentz, O. (2003): *Dealing with uncertainties in (de-)construction management – the contribution of fuzzy scheduling*, Proceedings of the 11th Rinker International Conference on Deconstruction and Materials Reuse, University of Florida, Gainesville, USA, 7.-10.5.2003 (forthcoming)
- [24] Schultmann, F.; Rentz, O. (2003): *Fuzzy Scheduling for the Dismantling of Complex Products*, in: Leopold-Wildburger, U.; Rendl, F.; Wäscher, G. (Eds.): *Operations Research Proceedings 2002, Selected Papers of the International Conference on Operations Research (SOR 2002)*, Klagenfurt, 2.-5.9.2002, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, S. 302-307

- [25] Sindt, V.; Ruch, M.; Schultmann, F.; Funk, W.; Rentz, O. (1997): *Technisch-wirtschaftliche Bewertung von Verfahren zur Oberflächendekontaminierung*, in: Bautechnik 74 (1997) 2, S. 127-131
- [26] Sprecher, A. (1994): *Resource-Constrained Project Scheduling - Exact Methods for the Multi-Mode Case*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- [27] Talbot, F. B. (1982): *Resource-constrained project scheduling with time-resource tradeoffs: The nonpreemptive case*, in: Management Science, Vol. 28 (1982), S. 1197-1210
- [28] Zimmermann, H. J. (1971): *Netzplantechnik*, de Gruyter, Berlin
- [29] Zimmermann, J. (2001): *Ablauforientiertes Projektmanagement: Modelle, Verfahren und Anwendungen*, Deutscher Universitäts Verlag, Wiesbaden