

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation und Ziel der Arbeit

Angesichts der internationalen Verpflichtungen zur Einhaltung der Pariser Klimaziele ist die Dekarbonisierung des Transportsektors von entscheidender Bedeutung. Dieser Sektor verursacht heutzutage einen erheblichen Anteil von 24 % der globalen CO₂-Emissionen [1]. Eine besonders vielversprechende Maßnahme zur Dekarbonisierung des Transportsektors ist die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Diese Strategie wird bereits von zahlreichen Automobilherstellern aktiv verfolgt, die ihre Entwicklungspläne darauf ausrichten, im nächsten Jahrzehnt vollständig auf Elektrofahrzeuge umzusteigen. Zusätzlich hat das Europäische Parlament beschlossen, dass neu zugelassene Personenkraftfahrzeuge und leichte Nutzfahrzeuge in der europäischen Union ab 2035 keinen Verbrennungsmotor haben dürfen [2]. Bereits heute steigen die Verkaufszahlen von Elektrofahrzeugen exponentiell an. Im Jahr 2022 waren über 26 Millionen Elektroautos weltweit zugelassen, was einer Verfünffachung des Bestands im Vergleich zu 2018 und einem Anstieg um 60 % im Vergleich zu 2021 entspricht [3].

Allerdings verursachen batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs) derzeit in der Herstellungsphase fast doppelt so viele Treibhausgasemissionen wie vergleichbare Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, was hauptsächlich auf die ressourcenintensive Produktion der Batterie, insbesondere durch die Primärmaterialaufbereitung und die Produktion der Batteriezellen, zurückzuführen ist [4, 5]. Dennoch weisen Elektrofahrzeugbatterien (EVB) eine deutlich bessere Umweltbilanz auf, wenn erstens erneuerbare Energien zum Laden der Batterie während der Nutzungsphase verwendet werden und zweitens die Elektrifizierung im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft er-

folgt [4, 5]. In diesem Zusammenhang spielt die Batterie eine entscheidende Rolle. Sie ist nicht nur die teuerste Komponente in BEVs mit einem Kostenanteil von bis zu 50 %, sondern enthält auch wertvolle und strategisch relevante Materialien und Komponenten, die wiederverwendet werden müssen, um (i) die Treibgasemissionen durch den Abbau, Raffination und Transport der Rohstoffe zu reduzieren, (ii) die Batteriekosten zu senken und (iii) die Versorgungsabhängigkeit langfristig zu minimieren [5].

1.1.1 Demontage von Batteriesystemen

Motivation

Unabhängig von den End-of-Life-Strategien für Batteriesysteme müssen diese demontiert werden, um die Lebensdauer der verschiedenen Komponenten insbesondere der Batteriezellen in hochwertigen Kreislaufwirtschaftsstrategien wie beispielsweise Remanufacturing und Repurposing zu verlängern oder sie effizient zu recyceln [6, 7]. Die Demontage von EVBs erfolgt heutzutage manuell, was zu Engpässen bei der Verarbeitung von Batterien am Ende ihrer Lebensdauer führt. Darüber hinaus birgt die manuelle Demontage solcher Produkte Sicherheitsrisiken, wie z. B. thermisches Durchgehen aufgrund chemischer Kettenreaktionen, Brandgefahr aufgrund von Kurzschlüssen und Auslaufen von Chemikalien aufgrund mechanischer Beschädigungen [5, 8]. Aus diesen Gründen stellt die Automatisierung der Demontage einen notwendigen Schritt dar, um die Kreislaufführung von EVBs zu fördern. Die zwei relevanten Projekte zur Automatisierung der Demontage von EVBs in Deutschland sind DeMoBat [9] und DemoSens [10]. Es gibt verschiedene Automatisierungsansätze in diversen Projekten wie AutoBatRec2020 [11] und Lithorec [12] [13]. Diese Ansätze weisen jedoch oft niedrige Technologiereifegrade auf oder sind bisher nur konzeptionell erarbeitet worden.

Im Rahmen des Projekts DeMoBat wurden innovative Roboterkonzepte entwickelt, die eine effiziente Demontage von Traktionsbatterien ermöglichen. Der Fokus lag dabei auf dem Öffnen der Batteriesysteme und der Demontage der internen Komponenten, insbesondere der Extraktion der Batteriemodule. Ein zentrales Ziel des DeMoBat-Ansatzes bestand darin, technologieunabhängige Lösungen zu entwickeln, die sich für verschiedene Batterievarianten eignen. Daher wurden möglichst wenige Annahmen über die Form und Beschaffenheit der Batteriesysteme getroffen. Die entwickelten Konzepte zeichnen sich durch ihre Flexibilität aus und bieten Industrie-

unternehmen die Möglichkeit, maßgeschneiderte Teilkonzepte für ihre individuellen Herausforderungen auszuwählen und in ihre Prozessketten zu integrieren.

Designflexible Systeme und Methoden sind in diesem Kontext entscheidend, um die Lücke zwischen Forschung und Industrialisierung zu schließen. Dies gilt auch für Methoden zur Planung und Optimierung von Demontagestrategien unter Berücksichtigung unterschiedlicher Rahmenbedingungen.

Fokus der Arbeit

Diese Arbeit befasst sich *im ersten Teil* mit adaptiven und generischen Methoden zur Untersuchung von Demontageszenarien für Batteriesysteme. Dies beinhaltet zunächst ein adaptives und selbstkonfigurierendes Simulationsmodell, das eine automatisierte Modellerstellung und -initialisierung unter Berücksichtigung des Produktdesigns und des Layouts der Demontagestation ermöglicht. Das Modell kann für die Untersuchung und Optimierung von Demontageszenarien, aber auch als Unterstützungswerkzeug bei der Auslegung von Demontagestationen dienen.

Zusätzlich wurde eine generische Methode zur Mehrzieloptimierung von Demontagestrategien unter Berücksichtigung der Kreislaufwirtschaftsstrategien Reuse, Remanufacturing, Repurposing und Recycling als Teil der Demontagsstrategieplanung entwickelt. Neben der optimalen Demontagesequenz ermöglicht die Methode die Bestimmung der optimalen Kreislaufwirtschaftsstrategien auf Komponentenebene und der optimalen Demontagetiefe.

1.1.2 Skalierung von Batteriezellen

Motivation

Im aktuellen Stand der Technik stellen die Faktoren Energiedichte, Kosten, Performance und Sicherheit die maßgebenden Kriterien bei der Auslegung von Batteriesystemen für den Automobilbereich dar. Allgemeingültige Richtlinien für die demontagefreundliche Auslegung dieser Systeme sind nicht vorhanden und vereinzelt Empfehlungen in dieser Richtung finden kaum Anwendung. Um die Demontagefreundlichkeit, als Treiber der Kreislaufführung von Batterien, zu erhöhen, müssen diverse Maßnahmen bereits in der Designphase ergriffen werden, um beispielsweise die Zugänglichkeit der Verbindungstechnik für Demontagewerkzeuge sicherzustellen. Viel wichtiger ist es, die Anzahl der Teile in einem Batteriesystem zu minimieren und dadurch die Fertigungstechnik sowohl bei der Demontage als auch Montage

zu vereinfachen. Diese Designphilosophie wird heutzutage Elon Musk zugeschrieben und wird in der Regel mit der Idee der Einfachheit und Effizienz in Design und Fertigung in Verbindung gebracht: *'The best part is no part. The best process is no process'*, Elon Musk. Die Überführung dieses Prinzips auf EVBs lässt sich durch zwei Ansätze realisieren: (i) die Minimierung der elektrochemisch passiven Teile, beispielsweise durch die Änderung der Batteriearchitektur von der Modulbauweise hin zu Cell-to-Pack Architekturen, und (ii) die Senkung der Anzahl der energiespeichernden Batteriezellen. Damit dies nicht auf Kosten der Speicherkapazität erfolgt, müssen die Zellen größer werden. Allerdings bringt die Skalierung der Dimensionen von Batteriezellen, design- und fertigungsbedingt, große technische Herausforderungen mit sich, um die durch die Skalierung hervorgerufenen Inhomogenitäten beim Betrieb der Zellen entgegenzuwirken. Dies betrifft alle Zellformate, wobei das Optimierungspotential am größten ist, wenn zylindrische Batteriezellen verwendet werden, da sie verhältnismäßig ein kleines Volumen aufweisen und somit mehrere Tausend Batteriezellen für ein Batteriesystem benötigt werden. Das Ziel ist, weniger als 1000 Zellen einzusetzen, um einerseits so wenig Zellen wie möglich zu verbauen und andererseits den benötigten Energiegehalt als Produkt der Batteriespannung U_B und der Batteriekapazität C_B zu realisieren. Allerdings geht eine Vergrößerung des Durchmessers einer zylindrischen Batteriezelle um den Faktor n mit einer Vergrößerung der benötigten Elektrodenlänge um ungefähr den Faktor n^2 einher. Die überproportionale Steigung der Elektrodenlänge, wenn der Durchmesser größer wird, führt zu Inhomogenitäten in diversen physikalischen Eigenschaften wie beispielsweise der Temperatur und der Stromdichte, was die Zellperformance verringern und Sicherheitsrisiken mit sich bringen kann. Skalierbare Zelldesigns zeichnen sich dadurch aus, dass die elektrischen und thermischen Transportwege axial angeordnet und somit von der Elektrodenlänge unabhängig sind. Diese Designs werden in der Literatur als *Tabless Zellen* bezeichnet und erfordern neue Produktionstechnologien.

Fokus der Arbeit

Ziel *des zweiten Teils* dieser Arbeit ist die Entwicklung eines automatisierten Produktionssystems für die design- und formatflexible Produktionserforschung skalierbarer zylindrischer Batteriezellen. Der Fokus liegt dabei auf der Wickelherstellung als Kernprozess der Zellaassemblierung. Zunächst wird eine Produktanalyse durchgeführt, um die Zelleigenschaften und Designmerkmale systematisch zu erfassen. Als Ergebnis kann das Produkt zylindrische Batteriezelle generisch beschrieben werden,

um ein modulares Produktionskonzept abzuleiten und eine designflexible Produktionsanlage zu entwickeln und zu realisieren.

1.2 Forschungsfragen

Im Folgenden werden die Forschungsfragen dieser Arbeit ausgehend vom Stand der Technik hergeleitet.

1.2.1 Die erste Forschungsfrage

Wissenschaftliche Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Demontage befassen sich hauptsächlich mit drei thematischen Schwerpunkten: (i) Kapazitätsplanung, wie z. B. Modelle zur Vorhersage von Rücklaufmengen [14, 15], (ii) Ausbalancierung von Demontagelinien, d. h. der Prozess der Zuweisung von Demontageaufgaben zu Arbeitsstationen [16, 17], und (iii) Planung und Optimierung von Demontagestrategien unter Verwendung eines [18] oder mehrerer Zielkriterien [19, 20].

Bisher gibt es nur wenige Veröffentlichungen, die sich mit der Planung und Optimierung von Demontageszenarien für Elektrofahrzeugbatterien auseinandergesetzt haben. Choux et al. [21] schlugen einen Aufgabenplaner für die robotergestützte Demontage von Elektrofahrzeugbatterien vor, wobei sich die Autoren ausschließlich auf die Identifizierung und Lokalisierung von Komponenten konzentrierten, um einen umsetzbaren Demontageplan zu erstellen. Wegener et al. [22] präsentierten einen Ansatz zur Planung der Demontagesequenz am Beispiel der Batterie des Audi Q5 Hybrid. Alfaro-Algebra et al. [23] stellten eine multikriterielle Funktion zur Optimierung von Demontagestrategien vor, wobei sowohl die Maximierung des wirtschaftlichen Gewinns als auch die Minimierung der Umweltauswirkungen berücksichtigt wurden. Die Autoren demonstrierten ihre Methodik anhand eines Audi A3 Sportback e-tron Hybrid-Batteriepacks. Ke et al. [24] präsentierten eine Methode zur Bestimmung des kürzesten Demontepfads von Elektrofahrzeugbatterien unter Verwendung einer Rahmen-Untergruppen-Struktur und eines genetischen Algorithmus. Hingegen stellten Xiao et al. [25] eine Methode zur Optimierung der Demontagesequenz vor, die auf einem dynamischen Bayes'schen Netzwerk basiert und die Unsicherheit in Bezug auf Batteriekategorien und -qualität berücksichtigt. Es ist anzumerken, dass alle genannten Arbeiten sich auf die drei theoretischen Schritte der Demontageplanung aus Produktperspektive konzentrierten: (i) Produktmodellierung, (ii) Sequenzsuche und (iii) Lösungsoptimierung [26]. Bemerkenswert ist je-

doch, dass bisher keine Simulationsmodelle veröffentlicht wurden, die sowohl das Batteriedesign als auch die Konfiguration der Demontagestation berücksichtigen. Solche Modelle ermöglichen zum einen, Demontagestrategien produktspezifisch unter Berücksichtigung des Layouts einer Demontagestation zu entwickeln, und zum anderen können sie als Unterstützungswerkzeug zur Auslegung von Demontagestationen genutzt werden. Daraus leitet sich die erste Forschungsfrage dieser Arbeit ab, die in Abbildung 1.1 schematisch präsentiert wird: ***Wie können Demontageszenarien unter Berücksichtigung des Produktdesigns und der Konfiguration der Demontagestation untersucht werden?***

1.2.2 Die zweite Forschungsfrage

Die Überführung von Batteriekomponenten in eine Kreislaufwirtschaft erfolgt durch die Anwendung verschiedener Kreislaufwirtschaftsstrategien. Diese Strategien unterscheiden sich hauptsächlich in Bezug auf die Aufbereitung der Komponenten und ihre Verwendungsbereiche. Die Europäische Kommission hat in ihrer Abfallhierarchie fünf Prioritäten festgelegt [27]. In dieser Arbeit werden ausschließlich die obersten drei Prioritäten berücksichtigt, da diese in einer Kreislaufwirtschaft vorrangig behandelt werden sollen. Die höchste Priorität liegt auf der Abfallvermeidung, beispielsweise durch die Verlängerung der Produktlebensdauer mittels vorausschauender Wartung oder Reparaturmaßnahmen. Die zweite Priorität ist die Reparatur zur Wiederverwendung, gefolgt vom Recycling. Diese Prioritäten lassen sich durch verschiedene Kreislaufwirtschaftsstrategien realisieren. Potting et al. [28] haben zehn solcher Strategien identifiziert und in drei Kategorien unterteilt: (i) intelligenterer Produktnutzung und -herstellung, (ii) Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und ihren Teilen und (iii) Verwendung von Materialien. Diese Arbeit fokussiert die Strategien, die in der End-of-Life (EoL)-Phase angewendet werden können. Kreislaufwirtschaftliche Lösungen für die Phasen Design, Produktion und Nutzung werden nicht berücksichtigt.

EoL-Strategien lassen sich auf vier Ansätze reduzieren: Reuse, Remanufacturing, Repurposing und Recycling. In der Literatur existieren unterschiedliche Definitionen für diese Strategien. In dieser Arbeit werden die Definitionen von Potting et al. [28] übernommen: Reuse bedeutet die Nutzung einer ausgedienten Batterie oder eines Satzes ihrer Komponenten durch einen anderen Nutzer im Automobilbereich. Remanufacturing beschreibt die Aufbereitung von Batterieteilen, so dass sie zumindest den Anforderungen neu hergestellter Batterien entsprechen, um sie für die Herstel-

lung von Antriebsbatterien zu verwenden. Wenn eine ausgediente Batterie oder ihre Teile aufbereitet und in einem anderen Anwendungsbereich eingesetzt werden, wie beispielsweise in der stationären Energiespeicherung, spricht man von Repurposing. Recycling hingegen zielt auf die Rückgewinnung von Materialien ab. Dabei strebt man die Gewinnung reiner und hochwertiger Materialien an, die im Automobilssektor in einem geschlossenen Kreislauf wiederverwendet werden können.

Die Zuordnung der Komponenten von Elektrofahrzeugbatterien zu verschiedenen Kreislaufwirtschaftsstrategien hängt von ihrem Zustand ab. Allerdings spielen weitere Faktoren wie Demontagenkosten und Marktbedingungen, einschließlich potenzieller Erlöse, eine entscheidende Rolle. Da die gewählte Kreislaufstrategie die zu verwendenden Demontagemodi¹ definiert und somit die Demontagenkosten beeinflusst, ist die Entscheidungsfindung über die End-of-Life Strategie als integraler Bestandteil der Demontageplanung zu betrachten. An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an und unterscheidet sich von den Ansätzen in der Literatur, die sich ausschließlich auf Produktmodellierung, Sequenzfindung und Lösungsoptimierung konzentrieren. Die zweite Forschungsfrage dieser Arbeit, die in Abbildung 1.2 schematisch dargestellt wird, lautet: ***Wie können Kreislaufwirtschaftsstrategien in die Planung der Demontagestrategie integriert werden?***

1.2.3 Die dritte Forschungsfrage

Zylindrische Zellen spielen eine wichtige Rolle im Automobilbereich sowie in verschiedenen anderen Anwendungen aufgrund zahlreicher Vorteile, wie beispielsweise ihrer einfachen Herstellung und ihrer hohen mechanischen Stabilität. Allerdings weisen konventionelle zylindrische Zellen in Bezug auf ihr Design verschiedene Nachteile auf, die eine Skalierung ihrer Dimensionen einschränken. Das liegt an tabdesignbedingte Designheterogenitäten, die verlängerte elektrische und thermische Transportwege mit sich bringen [29]. Hingegen stellt die Vergrößerung zylindrischer Zellen eine vielversprechende Maßnahme dar, um die Anzahl der Komponenten in einem Batteriesystem erheblich zu reduzieren und somit zur Demontagefreundlichkeit von EVBs beizutragen. Hinzu ermöglicht die Skalierung zylindrischer Batteriezellen die Erhöhung der Energiedichte [30] und die Senkung der Produktionskosten sowohl auf Zell- als auch auf Modul- und Systemebene [31] durch die Vereinfachung der Produktion [32].

Die begrenzten Massen- und Ladungstransportmechanismen in zylindrischen Zel-

¹Auf die Demontagemodi wird in Abschnitt 3.1 ausführlich eingegangen.

len mit klassischem Tabdesign führen zu zahlreichen Herausforderungen aufgrund von Inhomogenitäten in verschiedenen physikalischen Eigenschaften, wie zum Beispiel Temperatur, Stromdichte, mechanischer Spannung, Ladezustand und Teilchenkonzentration [32–35]. Waldmann et al. [36] haben gezeigt, dass die Verwendung von Tabs in konventionellen Zellen einen signifikanten Einfluss auf die zyklische Lebensdauer der Zellen hat. Nachteile des klassischen Tab-Designs sind Sicherheitsbedenken aufgrund der Gefahr eines thermischen Durchgehens, Lebensdauerbeschränkungen aufgrund beschleunigter und ungleichmäßiger Alterung sowie Effizienzverluste aufgrund ungleichmäßiger Beanspruchung der Elektrodenmaterialien. Hinzu kommen Produktionsnachteile durch den Einsatz zusätzlicher Bauteile, die weitere Produktionsschritte erfordern, Diskontinuitäten in der Produktionskette verursachen und Qualitätsprobleme mit sich bringen.

Skalierbare Zelldesigns kennzeichnen sich dadurch aus, dass die elektrischen und thermischen Pfade axial angeordnet sind und somit von der Elektrodenlänge unabhängig sind. Diese Zellen werden in der Literatur als *Tabless* bezeichnet [37]. Sie tragen maßgeblich dazu bei, Inhomogenitäten in zylindrischen Batteriezellen zu eliminieren, sodass großformatige Zellen für künftige Batteriearchitekturen realisiert werden können. Dies ist jedoch mit neuartigen Prozessen bei der Wickelherstellung und Zellkontaktierung verbunden. In diesem Kontext ordnet sich die dritte Forschungsfrage dieser Arbeit ein: ***Welche Zelldesigns und Produktionsmethoden sind erforderlich, um das Volumen zylindrischer Batteriezellen zu erhöhen und somit die Anzahl der Bauteile in einem Batteriesystem zu minimieren, um die Demontagefreundlichkeit zu steigern?*** Diese Forschungsfrage wird in Abbildung 1.3 schematisch dargestellt.

Wie können Demontageszenarien unter Berücksichtigung des Produktdesigns und der Konfiguration der Demontagestation untersucht werden?

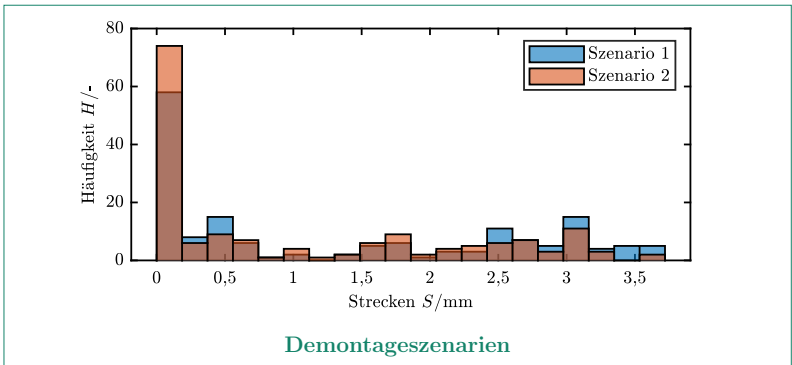
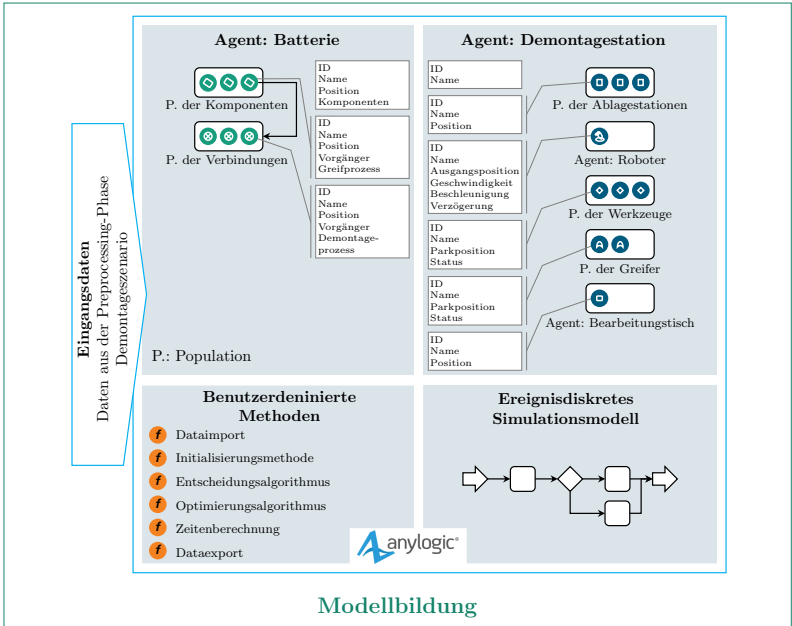


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung der ersten Forschungsfrage.

*Wie können Kreislaufwirtschaftsstrategien
in die Demontagestrategieplanung integriert werden?*

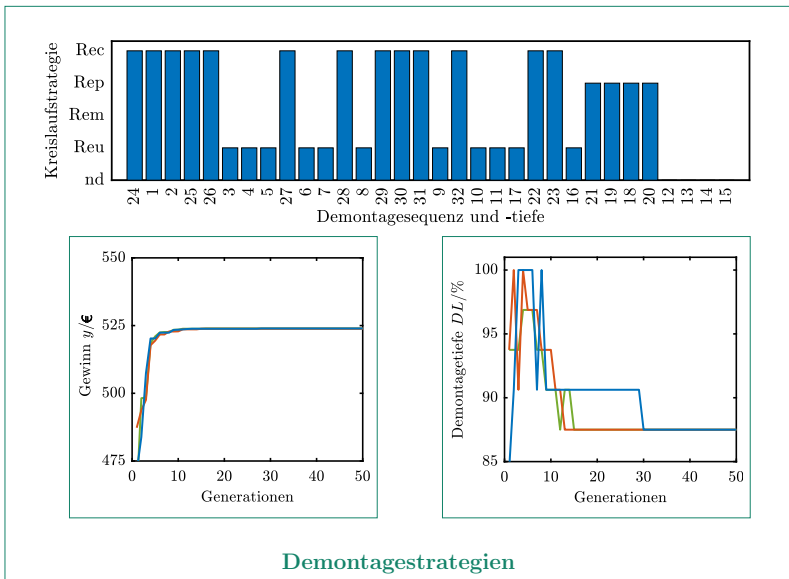
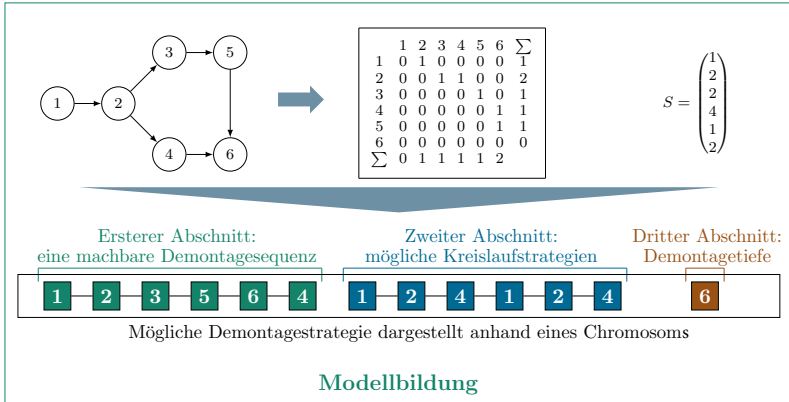


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung der zweiten Forschungsfrage.