

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Bei mobilen Systemen, insbesondere bei Nutz-, Personen- und Schienenfahrzeugen, stehen die resultierenden Kosten zum Betrieb der Fahrzeuge immer stärker im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Für die Wirtschaftlichkeit des mobilen Systems sind die Kosten, die über den gesamten Zeitraum des Einsatzes entstehen von Interesse. Zu diesen Kosten, welche auch als Lebenszykluskosten (engl. Life-Cycle Cost) [SIE95] bezeichnet werden, zählen

- die Anschaffungskosten zu Beginn des Life-Cycles,
- die Betriebskosten und Instandhaltungskosten während des Life-Cycles
- sowie die Kosten für die Verschrottung zum Ende des Life-Cycles.

Die Lebenszykluskosten stellen aufgrund des gestiegenen Kostendrucks für den Nutzer des mobilen Systems ein kaufentscheidendes Kriterium dar. Aus diesem Grund sind die Hersteller von mobilen Systemen gezwungen, die einzelnen Kostenanteile der Lebenszykluskosten zu reduzieren um den wirtschaftlichen Erfolg ihrer Produkte zu sichern beziehungsweise Wettbewerbsvorteile gegenüber den Mitkonkurrenten zu erlangen.

Die Instandhaltungskosten, als ein nicht zu vernachlässigender Anteil der Lebenszykluskosten, bestehen überwiegend aus Material- und Arbeitskosten. Tabelle 1-1 zeigt die jährlichen Instandhaltungskosten sowie den prozentualen Anteil an den Lebenszykluskosten für verschiedene Fahrzeugkategorien.

Instandhaltungskosten Fahrzeugkategorie	Jährliche Instandhaltungskosten	Anteil an den Life-Cycle Kosten
Nutzfahrzeuge > 6 Tonnen [MER02]	5.625 €	8 %
Transporter [UNG99]	910 € – 3.400 €	10 % – 17 %
Personenfahrzeuge [BUB02]	1.230 €	15,6 %

Tabelle 1-1: Jährliche Instandhaltungskosten sowie deren prozentualer Anteil an den Life-Cycle Kosten für verschiedene Fahrzeugkategorien

Auf der Grundlage der dargestellten prozentualen Anteile der Instandhaltungskosten an den Life-Cycle Kosten bieten diese das Potential, die Wirtschaftlichkeit der privat oder kommerziell genutzten Fahrzeuge zu verbessern um damit Wettbewerbsvorteile gegenüber der Konkurrenz zu erlangen. Hiermit beschäftigen sich auch regelmäßige Untersuchungen des ADAC's, die die Instandhaltungskosten ausgewählter Modelle innerhalb verschiedener Fahrzeugklassen gegenüberstellen [KRO05] und somit den Kunden Vergleichsmöglichkeiten bieten.

Neben diesen offensichtlichen Instandhaltungskosten sind weitere verdeckte Kosten aus dem Umfeld der Instandhaltung zu berücksichtigen. Hierzu zählen eventuelle Schadens- oder Schadensfolgekosten, welche aus mangelnden, zu spät oder nicht durchgeführten Instandhaltungsarbeiten resultieren und nur schwer monetär zu beziffern sind. Dabei können derartige Schäden vermieden werden, wenn altersschwache Betriebsmittel rechtzeitig erneuert werden, wie aus einer ADAC-Untersuchung [ADA00] hervorgeht. Eine weitere Folge nicht oder zu spät durchgeführter Instandhaltungsarbeiten ist, dass die Sicherheit und Zuverlässigkeit mobiler Systeme stark beeinträchtigt wird. Dies zeigt auch die alljährliche Erhebung der Technischen Überwachungsvereine TÜV. Hiernach gab es noch nie so viele unsichere Autos auf den Straßen. Von 7,6 Millionen Hauptuntersuchungen im Jahr 2005 waren 0,05 % verkehrsunsicher und 18,9 % wiesen technische Mängel auf, welche die Sicherheit und Zuverlässigkeit beeinflussen. Rechnet man die leichten Mängel hinzu (33,7 %), waren mehr als die Hälfte aller Fahrzeuge nicht in einem technisch einwandfreien Zustand. Besonderen Anlass zur Sorge bereiten den TÜV-Ingenieuren die hohe Defektrate am Fahrwerk und die schlechte Bremswirkung vor allem bei älteren Fahrzeugen [TÜV06].

Darüber hinaus sind die Kosten, die aus einer verringerten Verfügbarkeit resultieren und häufig nicht beachtet werden, zu berücksichtigen. Die Verfügbarkeit wird durch die Überführungszeiten, die Standzeiten sowie die Instandhaltungszeiten infolge der geplanten und ungeplanten Instandhaltungsaktivitäten beeinflusst. Um eine hohe Verfügbarkeit sicherzustellen, werden im kommerziellen Bereich Reservefahrzeuge zur Sicherung der Transportaufgaben bereitgehalten, was zu einer weiteren Steigerung der allgemeinen Kapital- und Instandhaltungskosten führt.

Neben der rein wirtschaftlichen Betrachtung ist bei der Instandhaltung mobiler Systeme der Umweltschutz nicht zu vernachlässigen. Hierbei können vorzeitige aber auch verspätete Instandhaltungsmaßnahmen zu Umweltbelastungen führen, indem entweder bei einem zu frühen Austausch der Betriebsmittel wertvolle Ressourcen ungenutzt bleiben oder bei verspäteten Instandhaltungen die Betriebsmittel unnötig die Umwelt belasten.

1.2 Aktueller Stand der Instandhaltungsorganisation

Die Organisation der Instandhaltung von mobilen Systemen reicht von dem bekannten Wartungscheckheft über eine elektronische Wartungsintervallanzeige bis hin zu rechnerbasierten Systemen. Im Nachfolgenden wird der aktuelle Stand der Instandhaltungsorganisation von mobilen Systemen näher dargestellt.

1.2.1 Vorbeugende Instandhaltung

Bei der Instandhaltung von mobilen Systemen ist noch immer die vorbeugende Instandhaltungsstrategie weit verbreitet. Hierbei wird das mobile System nach vorgegebenen Kilometer- oder Zeitintervallen instand gesetzt. Die Auslegung der betriebsmittelspezifischen Instandhaltungsintervalle erfolgt auf Grundlage von Erfahrungen oder empirischen Auswertungen des Herstellers oder des Instandhalters und beinhaltet genügend Reserven um das Risiko eines Ausfalls innerhalb des Instandhaltungsintervalls zu minimieren.

Betriebsmittel die annähernd gleiche Instandhaltungsintervalle besitzen, werden zu Wartungspaketen zusammengefasst. Die aus den Wartungspaketen resultierenden Instandhaltungsintervalle sowie die notwendigen Inhalte sind in dem Wartungsscheckheft dokumentiert. Dabei handelt es sich um statische Vorgaben für die Instandhaltungsintervalle und -inhalte. Einsatz findet diese Form der Instandhaltungsorganisation bei einer Vielzahl von mobilen Systemen. Für die Einhaltung der Instandhaltungsintervalle ist der Nutzer oder Betreiber des mobilen Systems verantwortlich.

1.2.2 Vorbeugende Instandhaltung mit nutzungsabhängigen Intervallen

Auf der Grundlage der zuvor dargestellten vorbeugenden Instandhaltungsstrategie wurde in [GÖR91] ein erster Ansatz zur Flexibilisierung der Instandhaltung von Nutzfahrzeugen vorgeschlagen. Hierfür wurden die folgenden einsatzorientierten Wartungsgruppen festgelegt:

- Fernverkehr – geringe Belastung
- Nahverkehr – mittlere Belastung
- Erschwerter Betrieb – hohe Belastung (z. B. für Baustellenfahrzeuge)

Die genannten Wartungsgruppen unterscheiden sich in den Instandhaltungsintervallen mit einem Faktor von bis zu 4,5 zwischen dem Fernverkehr und dem erschwerten Betrieb. Damit konnten durch die Neuordnung der Wartungsgruppen die Intervalle entscheidend verlängert werden. Nachteil dieser Instandhaltungsorganisation zur Flexibilisierung ist die statische Festlegung einer Wartungsgruppe sowie der fehlende Bezug zum technischen Zustand der Betriebsmittel.

1.2.3 Rechnerbasierte on-board Instandhaltung

Die erste elektronische Wartungsintervallanzeige für Kraftfahrzeuge war das 1998 eingeführte ASSYST-System der Daimler-Benz AG, welches eine belastungsbasierte Motorölwartung ermöglicht [WAR98a]. Auf der Grundlage charakteristischer Motor- und Fahrzeuggrößen (Drehzahl, Last, Geschwindigkeit, Öltemperatur, Ölstand) wird ein Ölbelastungsfaktor ermittelt, der die Grundlage zur Berechnung des optimalen Ölwechsel-Zeitpunktes darstellt. Mit Hilfe dieses Systems können die Ölwechselintervalle von 15.000 km bis zu 30.000 km in Abhängigkeit der Belastung variiert werden.

Bei dem MANTRONIC – Fahrzeugführungsrechner der Firma MAN [HEI00] sowie dem TELLIGENT – Wartungssystem von Mercedes-Benz [WAR98b] handelt es sich um die

ersten, im Jahr 1998, kommerziell eingesetzten und rechnerbasierten on-board Instandhaltungssysteme für Nutzfahrzeuge. Bei beiden Systemen werden die Belastungen mehrerer Komponenten und Betriebsstoffe in Abhängigkeit charakteristischer Betriebsdaten ermittelt. Anhand der Belastungen werden die kilometerbasierten Instandhaltungsintervalle entsprechend verlängert oder verkürzt. Für die Ermittlung der Belastung werden Betriebsdaten wie beispielsweise die Motordrehzahl, die Betriebszeit, die Anzahl der Kaltstarts oder die Motoröltemperatur verwendet. Mit Hilfe der belastungsabhängigen Instandhaltungsintervalle konnten die Intervalle der Nutzfahrzeuge im Durchschnitt um 50 % gegenüber den starren Kilometerintervallen verlängert werden [BOR97].

Neben dem Nutzfahrzeugbereich verfügen seit dem Jahr 2002 die ersten Personenfahrzeuge ebenfalls über integrierte, rechnerbasierte Instandhaltungssysteme. Der Automobilhersteller BMW integriert das Condition Based Service (CBS) System in seine Fahrzeuge [DEI02] und Mercedes-Benz das ASSYST-PLUS [HÖF02] als Fortführung des 1998 eingeführten ASSYST-Systems. Bei diesen dargestellten Systemen für Personen- und Nutzfahrzeuge finden nur ausgewählte Betriebsmittel (z. B. Motoröl, Bremsbeläge) Beachtung, welche die Instandhaltung maßgeblich beeinflussen. Weitere Betriebsmittel (z. B. Luftfilter, Innenraumfilter, Bremsflüssigkeit) werden nicht betrachtet und ohne Berücksichtigung des technischen Zustands zeit- oder kilometerbasiert instand gesetzt. Das dargestellte Verfahren basiert auf der Erfassung der Belastung und verlängert oder verkürzt die vorgegebenen Instandhaltungsintervalle entsprechend. Genauer betrachtet handelt es sich hierbei um eine belastungsorientierte Flexibilisierung der Instandhaltungsintervalle.

Diese belastungsabhängigen Instandhaltungsintervalle werden durch das rechnerbasierte Instandhaltungssystem zusammen mit den starren zeit- oder kilometerbasierten Intervallen zeitlich zusammengelegt und dem Nutzer bzw. dem Servicepersonal zur Anzeige gebracht. Diese starre Zusammenlegung der Termine bietet keinerlei Flexibilität, Individualisierung und Transparenz der Instandhaltung für den Nutzer. Darüber hinaus werden technische, wirtschaftliche und nutzerspezifische Aspekte nicht oder nur unzureichend berücksichtigt.

1.2.4 Rechnerbasierte on-/off-board Instandhaltung

Das Fahrzeugdiagnosesystem ruDi [BUR96] für Schienenfahrzeuge im Bergwerksbetrieb zeichnet sich durch ein on-board sowie ein zusätzliches off-board System aus. Durch den Einsatz zusätzlicher Sensoren erfasst das on-board System eine Vielzahl von Betriebsdaten des Schienenfahrzeuges. Diese Sensorsignale werden vorverarbeitet und on-board gespeichert. Das off-board System nimmt zeit- oder eventgetriggert Verbindung mit dem on-board Rechner auf und ermöglicht die Durchführung verschiedener Diagnoseverfahren zur genaueren Auswertung der on-board Daten. Auf der Grundlage der gewonnenen Daten lässt sich eine Vielzahl von spezifischen Analysen (Drehzahl-, Hochdruck- und Körperschallanalyse) zur Erkennung von Fehleinstellungen oder zur Ermittlung des Instandhaltungsbedarfs durchführen.

Durch eine zusätzliche Schnittstelle des off-board Systems zu einem externen Instandhaltungsplanungs- und -steuerungssystem werden Funktionen zur Generierung und Verwaltung von Arbeitsplänen zur Verfügung gestellt.

1.2.5 Flotteninstandhaltungsmanagement

In [BUR01] wird ein System zur Flotteninstandhaltung von Schienenfahrzeugen im Bergwerksbetrieb dargestellt. Die on-board gesammelten Daten werden über das Internet visualisiert. Mit Hilfe der Fahrzeugdaten kann der Disponent, Betreiber oder der Instandhalter den Einsatz der Fahrzeuge koordinieren und wird über den aktuellen Status (technischer Zustand, Beladung, Kraftstoffverbrauch, usw.) sowie die Position des Fahrzeuges informiert.

Als kommerzielle Lösung aus dem Nutzfahrzeugbereich existiert das Flottenmanagementsystem FLEETBOARD [FLE04] [MAU01] von Mercedes-Benz, welches auf dem rechnerbasierten TELLIGENT - Wartungssystem aufbaut. Über eine Telematikchnittstelle werden die notwendigen Daten zwischen dem Lastwagen und der Spedition sowie der Werkstatt in Form von Textmeldungen (SMS) über das Mobilfunknetz an den Server der Zentrale übermittelt. Von der Zentrale werden die Daten aufbereitet und ins Internet gestellt, wo sie für den Spediteur verfügbar sind. Alternativ besteht für den Spediteur die Möglichkeit, Dispositionsaufträge über das Internet ins Fahrerhaus zu senden. Seit der Markteinführung im Jahr 2000 bietet das FLEETBOARD System bis heute die folgenden Funktionen an: Serviceplanung auf Grundlage des TELLIGENT - Wartungssystems, Störfallmanagement, Einsatzanalyse, Tour-Aufzeichnung, Textkommunikation mit dem Fahrzeug sowie die europaweite Positionsdarstellung auf einer digitalen Karte.

1.2.6 Bewertung

Eine übergreifende zustandsbezogene Instandhaltungsorganisation von mobilen Systemen ist bei den derzeit im Einsatz befindlichen Instandhaltungssystemen nicht erkennbar. Bei den rechnerbasierten Systemen werden wenige, meist ausgewählte Betriebsmittel betrachtet, welche die Instandhaltung der mobilen Systeme beeinflussen. Hierzu werden die Instandhaltungsintervalle anhand der Belastung der Betriebsmittel entsprechend verkürzt oder verlängert. Verbleibende Betriebsmittel werden zeit- oder kilometerbasiert an diesen resultierenden Intervallen ausgerichtet.

Bei der Instandhaltungsplanung handelt es sich um statische und kurzfristige Planungsalgorithmen, welche auf fest definierten Regeln basieren. Sie sind nicht in der Lage eine dynamische Anzahl von Einzelbetriebsmitteln mit ihren charakteristischen Eigenschaften zu verarbeiten. Eine vorausschauende Instandhaltungsplanung findet keine Berücksichtigung, da hier die notwendigen Zustandsinformationen über das zukünftige Verhalten der Betriebsmittel fehlen. Ebenso werden verfügbare Diagnoseinformationen in den Instandhaltungssystemen nicht berücksichtigt, obwohl beide Domänen voneinander profitieren können. Der Einfluss von technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen sowie Nutzervorgaben zur Individualisierung der Instandhaltungsmaßnahmen sind nicht erkennbar.

Bereits heute existieren Verfahren zur Bestimmung der technischen Zustände von Komponenten und Betriebsstoffen, so dass einer zustandsbezogenen Instandhaltung nichts mehr im Weg steht. Die hierfür notwendige Zustandsbeschreibung wird durch die technische Diagnose (indirekte Verfahren), die Sensortechnik (direkte Verfahren) sowie die Mechatronik vorangetrieben und hat eine nicht zu vernachlässigende Auswirkung auf die Instandhaltung mobiler Systeme.

Die technische Diagnose ermöglicht die indirekte Bestimmung des Zustandes von Betriebsmitteln. Diese stellt die Grundlage einer zustandsbezogenen Instandhaltungsstrategie für die zukünftigen Fahrzeuggenerationen dar. Unterstützt wird diese Entwicklung durch die steigende Rechenleistung der eingesetzten on-board Elektroniken (Steuergeräte) sowie der informationstechnischen Vernetzung, die es ermöglicht, indirekte Verfahren zur Zustandsbeschreibung vermehrt und kostengünstig einzusetzen. Dies zeigen Anwendungen zur Innenraumluftfilterüberwachung [TRA00], der Stossdämpferüberwachung [CRA97] sowie der Batterieüberwachung [WAL01] deren wartungstechnischer Zustand durch den Einsatz der technischen Diagnose ermittelt wird.

Neben den indirekten Verfahren der Zustandsbeschreibung sind die direkten Verfahren auf Basis von Sensoren nicht zu vernachlässigen. Aufgrund der technologischen Weiterentwicklung, der neuen Herstellungsverfahren, der Miniaturisierung und der Kostenreduktion durch höhere Stückzahlen ist in Zukunft mit einem vermehrten Einsatz von Sensoren [LIN98] zur messtechnischen Erfassung des Instandhaltungszustandes von Betriebsmitteln zu rechnen für die in der Vergangenheit keine Messverfahren verfügbar waren. Dies zeigen Untersuchungen [AUT03], die ein Wachstum von 75 % für intelligente Sensoren im Automobilbereich prognostizieren. Besonders bei der Ermittlung von Betriebsstoffeigenschaften werden umfangreiche Anstrengungen unternommen, um eine Sensorik zur Qualitätsmessung von Betriebsstoffen (z. B. Kraftstoffe, Schmieröle, Hydraulik- und Bremsflüssigkeit, Frostschutzmittel) zu entwickeln [KAD00] [BOR97].

Weitere nutzbare Zustandsinformationen von Komponenten oder Teilsystemen stellen Mechatronikkomponenten zur Verfügung, welche neben der eigentlichen Funktion bereits umfangreiche Diagnose- und Instandhaltungsinformationen beinhalten [SCH02] [JEN02]. Dies zeigt der Einsatz einer intelligenten Fahrzeugbatterie [IQP00], welche ihren Wartungszustand (SOH) eigenständig ermittelt sowie der Einsatz mechatronischer Stellantriebe [MOS00] die den Instandhaltungszustand anhand integrierter Diagnoseverfahren ermitteln. Diese Zustandsinformationen werden dem Restsystem über standardisierte Bussysteme (z. B. CAN, LIN) zur Verfügung gestellt.

Ausgehend von diesen Betrachtungen ist zu erwarten, dass in nachfolgenden Generationen der mobilen Systeme die Qualität und Quantität der Informationen über den instandhaltungstechnischen Zustand von Betriebsmitteln enorm ansteigen wird. Zurzeit ist jedoch kein Instandhaltungssystem in der Lage, diese Informationsmenge geeignet zu verarbeiten um den vielfältigen Anforderungen der Instandhaltung gerecht zu werden.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Ausgehend von der eingangs dargestellten Problemstellung sowie dem Stand der Technik, ist die allgemeine Zielsetzung dieser Arbeit die Entwicklung eines neuen, ganzheitlichen Systemansatzes zur zustandsbezogenen Instandhaltung eines mobilen Systems. Dieser integrierte Systemansatz (on-board Systemansatz) soll die Kosten der Instandhaltung des mobilen Systems optimieren und gleichzeitig das hohe Maß an Sicherheit und Zuverlässigkeit heutiger mobiler Systeme beibehalten beziehungsweise erhöhen. Insbesondere soll der zu entwickelnde Systemansatz auf die heute bestehende Steuergerätearchitektur und Fahrzeugvernetzung aufbauen sowie die Randbedingungen (z. B. begrenzte Speicher- und Rechenressourcen, Kostendruck) von Kraftfahrzeugen berücksichtigen.

Um diesen vielfältigen Zielsetzungen nachzukommen, ist eine gesamtheitliche Betrachtung der Instandhaltung von mobilen Systemen erforderlich. Bei dem zu entwickelnden Systemansatz sind technische, wirtschaftliche und nutzerspezifische Aspekte entsprechend zu berücksichtigen und aufeinander abzustimmen.

Zur Berücksichtigung der technischen Aspekte der Instandhaltung sieht der zu entwickelnde Systemansatz den Einsatz von Verfahren der technischen Diagnose und der Überwachung vor. Hierdurch ist der instandhaltungstechnische Zustand aller relevanten Betriebsmittel des mobilen Systems zu ermitteln. Durch spezielle Verfahren der Nutzungsvorhersage lassen sich insbesondere Informationen zur möglichen Restnutzung der Betriebsmittel ableiten. Ausgehend von den unterschiedlichen Informationsquellen der Diagnose, der Überwachung und der Nutzungsvorhersage ist ein Verfahren zur informationstechnischen Verknüpfung der Informationsquellen sowie der einheitlichen Beschreibung des Instandhaltungsbedarfs aller relevanter Betriebsmittel des mobilen Systems zu entwickeln.

Neben den technischen Aspekten sind die wirtschaftlichen und nutzerspezifischen Aspekte in der nachfolgenden Planung zu berücksichtigen. Die zu entwickelnde Planungskomponente soll in Form eines rechnerbasierten Planungs- und Entscheidungssystems die planungstechnischen Aufgaben der Instandhaltung auf der Basis vorhandenen Instandhaltungswissens organisieren. In diesem Prozess der Planung ist der Nutzer interaktiv einzubeziehen um dessen Anforderungen berücksichtigen zu können.

Durch den Systemansatz sowie zusätzlicher on-/off-board Schnittstellen sind neue Dienste und Anwendungen für die Instandhaltung mobiler Systeme darzustellen. Realisiert werden soll dies durch ein, im Fahrzeug integriertes (on-board), Instandhaltungsmanagementsystem. Im Rahmen dieser Arbeit werden im speziellen Personen- und Nutzfahrzeuge betrachtet, die im Folgenden als mobile Systeme bezeichnet werden.

1.4 Gliederung der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in die Kapitel „Einleitung“, „Ganzheitlicher Systemansatz des Instandhaltungsmanagementsystems“, „Beschreibung des Betriebsmittelzustandes“, „Ermittlung des Instandhaltungsbedarfs“, „Instandhaltungsplanung“, „On-/Off-board Schnittstelle“ und

„Zusammenfassung und Ausblick“. Die Einordnung der technischen Kapitel innerhalb des Gesamtsystems ist in Abbildung 1-1 grafisch dargestellt und unterteilt sich in die Betriebsmittelebene und die Planungsebene.

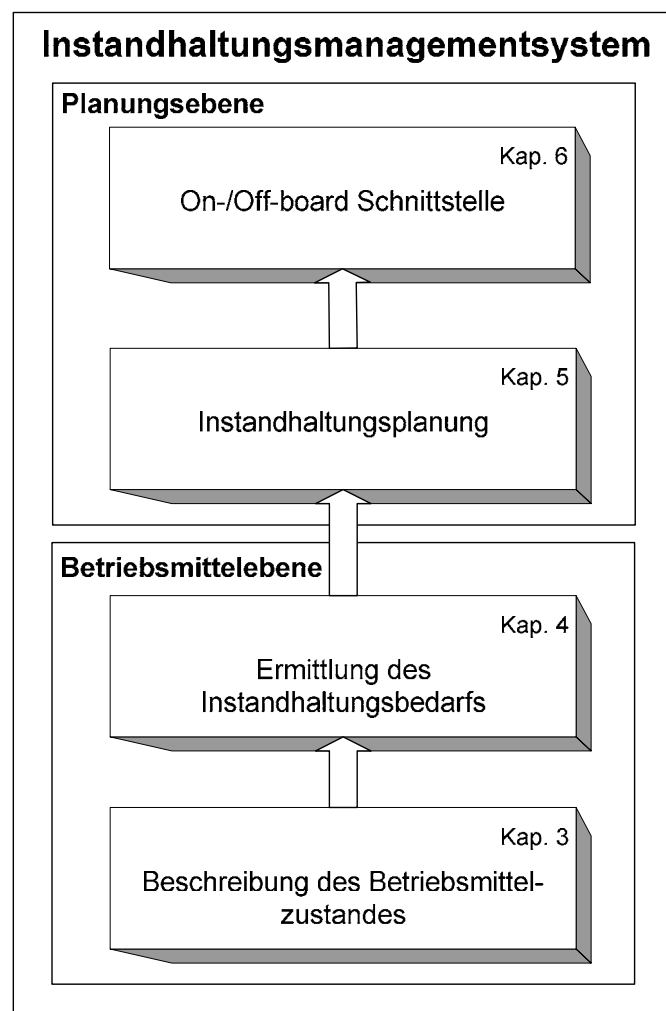


Abbildung 1-1: Einordnung der technischen Kapitel im Gesamtsystem

In dem folgenden Kapitel 2 werden die notwendigen Grundlagen der Instandhaltung dargestellt, Begrifflichkeiten definiert sowie die gängigen Instandhaltungsstrategien mit ihren Vor- und Nachteilen diskutiert. Darauf aufbauend wird ein neuer, ganzheitlicher Systemansatz für ein on-board Instandhaltungsmanagementsystem entwickelt.

Grundlage der Instandhaltung nach DIN 31051 [DIN85] ist die Feststellung und Beurteilung des Zustandes der einzelnen Betriebsmittel, welche in Kapitel 3 näher beschrieben werden. Es werden Verfahren zur Beschreibung des technischen Zustandes von Betriebsmitteln mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen vorgestellt und diskutiert. Anhand von zwei Anwendungsbeispielen aus dem Automobilbereich wird das neu erarbeitete Konzept für die Beschreibung des Betriebsmittelzustandes dargestellt.

Das Kapitel 4 beschreibt die Ermittlung des Instandhaltungsbedarfs der Betriebsmittel, welche die technische Grundlage der nachfolgenden Instandhaltungsplanung darstellt. Diese neue Strategie umfasst die Überwachung des technischen Zustandes der Betriebsmittel, die Vorhersage der Nutzungsendpunkte sowie die Aggregation der vorliegenden Informationsquellen. Anhand des in Kapitel 3 dargestellten Anwendungsbeispiels werden die notwendigen Schritte zur Ermittlung des Instandhaltungsbedarfs dargestellt. Der Fokus der Kapitel 3 und 4 liegt auf den Betriebsmitteln des mobilen Systems und wird als Betriebsmittelebene bezeichnet.

Kapitel 5 beschreibt die übergeordnete Planungsebene in der die Instandhaltungsplanung auf Basis des zuvor ermittelten Instandhaltungsbedarfs erfolgt. Diese Ebene generiert erstmals unter den technischen, wirtschaftlichen und nutzerspezifischen Anforderungen den hierfür optimalen Instandhaltungsplan. Zur Darstellung der Funktionsweise wird die Instandhaltungsplanung anhand eines Anwendungsbeispiels schrittweise erläutert. Den Abschluss von Kapitel 5 bilden Life-Cycle Simulationen für verschiedene Planungsszenarien.

Das Kapitel 6 zeigt die notwendigen on- und off-board Schnittstellen der Planungsebene. Diese Schnittstellen dienen der Interaktion mit dem Nutzer sowie zur Visualisierung und Übertragung der Instandhaltungsdaten. Auf Basis dieser Schnittstellen werden verschiedene Dienste und Anwendungen für den Nutzer, den Betreiber oder den Instandhalter dargestellt.

Kapitel 7 fasst den Inhalt dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf weiterführende Aspekte, die im Rahmen dieser Arbeit nicht bearbeitet wurden oder hierauf aufbauen.