

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***Entwicklung einer Planungsmethode zur Ersatzteillagermengenbestimmung in
Servicenetzen von Windenergieanlagen (EloWind)***

der Forschungsstelle(n)

Universität Bremen | Bremer Institut für Strukturmechanik und Produktionsanlagen

Das IGF-Vorhaben 17446 N der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e.V. (BVL)
wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Bremen, 06. August 2014

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Kirsten Tracht

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Inhaltsverzeichnis

1	Forschungsthema.....	1
2	Wissenschaftlich - technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	1
2.1	Anlass und Ausgangssituation	1
2.2	Stand der Wissenschaft und Technik.....	2
2.2.1	Instandhaltung von Windenergieanlagen	2
2.2.2	Verfahren zur Prognose von Bedarfen	5
2.2.3	Lagermengenbestandsplanung	6
2.2.4	Randbedingungen bei der Instandhaltung von Offshore-WEA.....	8
2.3	Forschungsziel	9
2.3.1	Angestrebte Forschungsergebnisse	9
2.3.2	Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	9
3	Ergebnisse	10
3.1	AP 100 Analyse des Antriebstranges.....	10
3.1.1	AP 110 Systemgrenzen- und Funktionsidentifikation	10
3.1.2	AP 120 Bestimmung kritischer und redundanter Komponenten.....	11
3.2	AP 200 Bedarfsprognose für Ersatzteile	14
3.2.1	AP 210 Deterministische Bedarfe.....	14
3.2.2	AP 220 Stochastische Bedarfe	15
3.2.3	AP 230 Berechnung der WEA-Ausfallwahrscheinlichkeit	22
3.3	AP 300 Analyse der Randbedingungen im Servicenetzwerk	24
3.3.1	AP 310 Erfassung der Engpassgrößen und -ressourcen	24
3.3.2	AP 320 Bestimmung der Instandhaltungsfähigkeit.....	25
3.4	AP 400 Definition einer Methode zur Lagerbestandsplanung von Ersatzteilen.....	27
3.4.1	AP 410 Quantifizierung von Minderbeständen	27
3.4.2	AP 420 Ausfallkosten in Abhängigkeit des Ausfallzeitpunktes.....	28
3.4.2	AP 430 Bestandsplanung unter Berücksichtigung der Instandhaltungsfähigkeit.....	31
3.5	AP 500 Ergebnistransfer und Dokumentation	33
3.5.1	AP 510 Dokumentation der Ergebnisse.....	33
3.5.2	AP 520 Veröffentlichung und Messe	33
4	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	33

4.1	Maßnahmen während des Projektes.....	34
4.2	Maßnahmen nach Abschluss des Projektes	35
4.3	Veröffentlichte Arbeiten während des Vorhabens	35
5	Einschätzung der Realisierbarkeit.....	36
6	Verwendung der Zuwendung	37
7	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	37
8	Planungstool – EloPlan – Bedienungsanleitung.....	37
8.1	Installation	38
8.1.1	Benötigte Pakete	38
8.2	Funktionen.....	38
8.2.1	Bedarfsprognose	39
8.2.2	Lagerbestandsplanung	46
8.2.3	Korrekturfunktion	48
8.3	Ergebnisausgabe	48
9	Zusammenfassung.....	53
10	Literatur	55

Bildverzeichnis

Bild 1: Schadenshäufigkeit von WEA-Komponenten [STG10, WEB10].....	3
Bild 2: Anlagenausfallzeit in Abhängigkeit von WEA-Komponenten [WEB10].....	3
Bild 3: Randbedingungen bei der Instandhaltung von WEA [TRA11b]	4
Bild 4: Antriebstrang einer WEA.....	11
Bild 5: Klassifizierung des Ersatzteilspektrums	12
Bild 6: Erneuerungsprozess	18
Bild 7: Servicelevel in Abhängigkeit der Lagermenge	20
Bild 8: bedingte Wahrscheinlichkeiten des Ausfalls	23
Bild 9: Mittlere Windgeschwindigkeit pro Tag (Jahre 2002 – 2010)	29
Bild 10: Abschnitte der GUI	39
Bild 11: Übersicht des Prognoseabschnitts.....	40
Bild 12: Optionen der exponentiellen Glättung und des gleitenden Durchschnitts.....	41
Bild 13: Eingabebeispiel der Gewichte bei WMA	42
Bild 14: Beispielaufbau einer Datendatei im CSV-Format.....	45
Bild 15: Eingabebeispiel normalverteilter Nachfrage unter Vorgabe eines Servicelevels	48
Bild 16: Beispiel einer Korrektur	48
Bild 17: Ergebnisübersicht des Beispieldatensatz bei SMA dritter Ordnung	49
Bild 18: Diagramme zu prognostiziertem und realem Bedarfsverlauf sowie der Lagerbestandsentwicklung.....	50
Bild 19: Lage des Speicherbuttons auf der Haupt-GUI	51
Bild 20: Auswahl der gewünschten Berechnung zur Speicherung in einer Excelarbeitsmappe.....	51
Bild 21: Aufbau der Ausgabedatei.....	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bedarfe durch technische Interdependenzen.....	13
Tabelle 2: Mitarbeiteranzahl zur Erneuerung von Bauteilen [o.V.13a]	25
Tabelle 3: Abkürzungen und Symbole der Bedarfsprognose.....	52
Tabelle 4: Abkürzungen und Symbole der Lagerbestandsplanung.....	52

Abkürzungen

bime	Bremer Institut für Strukturmechanik und Produktionsanlagen
DES	Double Exponential Smoothing
GAU	Größter anzunehmender Unfall
MAD	Mean Absolute Deviation
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
MSE	Mean Squared Error
SAE	Smoothed Absolute Error
SE	Smoothed Error
SES	Single Exponential Smoothing
SMA	Simple Moving Average
TES	Treble Exponential Smoothing
TS	Tracking Signal
WEA	Windenergieanlage
WMA	Weighted Moving Average

1 Forschungsthema

Das Forschungsprojekt hat die Servicelogistik für Offshore-Windenergieanlagen (WEA) zum Untersuchungsgegenstand. Das Ziel ist die Entwicklung einer Planungsmethode zur Ersatzteillagermengenbestimmung für Komponenten des Antriebsstranges. Die Lagerbestände werden in Abhängigkeit der technischen Eigenschaften, der temporären Unzugänglichkeiten der Offshore-WEA und unter Berücksichtigung der wesentlichen Kostenparameter optimiert.

2 Wissenschaftlich - technische und wirtschaftliche Problemstellung

2.1 Anlass und Ausgangssituation

Die vor dem Hintergrund des größten anzunehmenden Unfalls (GAU) in Fukushima am 11. März 2011 von der Bundesregierung beschlossene Energiewende sieht eine umfassende Veränderung der Stromerzeugung in Deutschland vor [BUN11]. Diese umfasst neben der Abschaltung aller Atomkraftwerke den Ausbau erneuerbarer Energien bis zum Jahr 2022. Eine Erweiterung des Anteils erneuerbarer Energien auf 50 % ist bis zum Jahr 2050 geplant [BUN10]. Das Kernelement der Energiewende in der deutschen Stromversorgung und Mittel zur Erreichung der Energieziele stellt die Installation von 4.500 Offshore-Windenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von 25.000 MW vor deutschen Küsten dar [UBA11]. Die erforderliche Versorgungssicherheit kann jedoch nur unter der Voraussetzung eines zuverlässigen Anlagenbetriebes und der Erweiterung bestehender sowie geplanter Windparks sicher gestellt werden. Zur Realisierung eines zuverlässigen Anlagenbetriebes dient die Instandhaltung. Der Begriff ist durch das Deutsche Institut für Normung (DIN) 31051 als „[...] die Gesamtheit der Maßnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des jeweils angestrebten Soll-Zustandes sowie der Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes von technischen Mitteln eines Systems [...]“ [DIN03, S. 1] bezeichnet. Auf die Instandhaltung entfallen bei WEA etwa 20–30 % der Lebenszykluskosten [HAU08]. Bei Offshore-WEA stellt die Instandhaltung jedoch eine besondere Herausforderung dar, weil die Zugänglichkeit zu den WEA eingeschränkt ist [TRA10a, TRA10b, WEB10]. So verhindert der stark wetterabhängige Einsatz von Helikoptern und Schiffen, die Personal und Ersatzteile zu den Offshore-WEA transportieren, und der Mangel an qualifiziertem Personal die Instandhaltungsarbeiten an vielen Tagen im Jahr [TRE11, HEI10].

Hauptursachen für unsichere Verfügbarkeit von WEA sind Schäden am Antriebsstrang, insbesondere am Getriebe [LÜB10]. Zur Wiederherstellung der Anlagenverfügbarkeit sind bei der Instandhaltung vielfach Ersatzteile erforderlich, die aufgrund langer Wiederbeschaffungszeiten von bis zu 18 Monaten [LÜB10], auf Lager vorgehalten werden müssen. Für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) stellt die Lagerhaltung der hochpreisigen Ersatzteile des Antriebsstranges eine finanzielle Belastung dar. Untersuchungen des VDMA zeigen, dass die Ersatzteilversorgung den Hauptanteil des Umsatzes verfügbarkeitswirksa-

mer Dienstleistungen ausmacht [VDM09], und unterstreichen damit deren wirtschaftliche Bedeutung.

Obwohl die Ersatzteilversorgung seit Jahrzehnten Gegenstand von Forschung und Entwicklung ist, existiert für die Betreiber von WEA Einsparpotenzial bei der Lagerhaltung und der Ersatzteillogistik, über das sie sich heute noch nicht bewusst sind [WAL11]. Vorhandene wissenschaftliche Methoden beziehen Umgebungseinflüsse in die Einsatzplanung [CHE01] oder die Ersatzteilversorgung von Maschinen und Anlagen ein [CAS05]. Letztere können nicht für die Offshore-Branche genutzt werden, da die Randbedingungen bei der Instandhaltung von Maschinen und Anlagen sowie Offshore-WEA verschieden sind. Eine Berücksichtigung meteorologischer Einflüsse sowie der Personal- und Transportmittelkapazität ist bereits zur Einsatzplanung bei der Errichtung von WEA Gegenstand der Forschung [TRA11a]. Die Verwendung in der Bedarfsplanung ist dagegen noch nicht in Planungsmethoden umgesetzt und bietet in Verbindung mit der Abbildung der technischen Anlagenstruktur und der Variantenvielfalt der Ersatzteile großes Potenzial zur Effizienzsteigerung der Ersatzteilversorgung im Offshore-Bereich. Das Ziel dieses Forschungsprojekts ist die finanzielle Entlastung von KMUs durch die Entwicklung eines Verfahrens zur dynamischen Lagerbestandsplanung für Ersatzteile von Offshore-WEA.

2.2 Stand der Wissenschaft und Technik

2.2.1 Instandhaltung von Windenergieanlagen

Bei Windenergieanlagen hat sich die Bauweise der Horizontalachs-Windenergieanlage des Typs "Luv-Läufer" technisch durchgesetzt: Die Rotorwelle verläuft horizontal zum Fundament und der Rotor wird in Windrichtung vor dem Turm angeströmt [GAS07]. Luv-Läufer-Maschinen können mit und ohne Getriebe ausgeführt sein, wobei im Offshore-Bereich WEA mit Getriebe zum Einsatz kommen. Zu den Komponenten des Antriebsstranges gehören Rotorwelle, Kupplung, Getriebe, mechanische Bremse und Generator. Sie sind jeweils eigenständig gelagert und auf der Trägerkonstruktion montiert [STG10, GAS07]. Bild 2 zeigt Schadenshäufigkeiten von Onshore-WEA in Abhängigkeit einzelner Komponenten. Die Daten stammen von der Firma Germanischer Lloyd und dem Fraunhofer Institut.

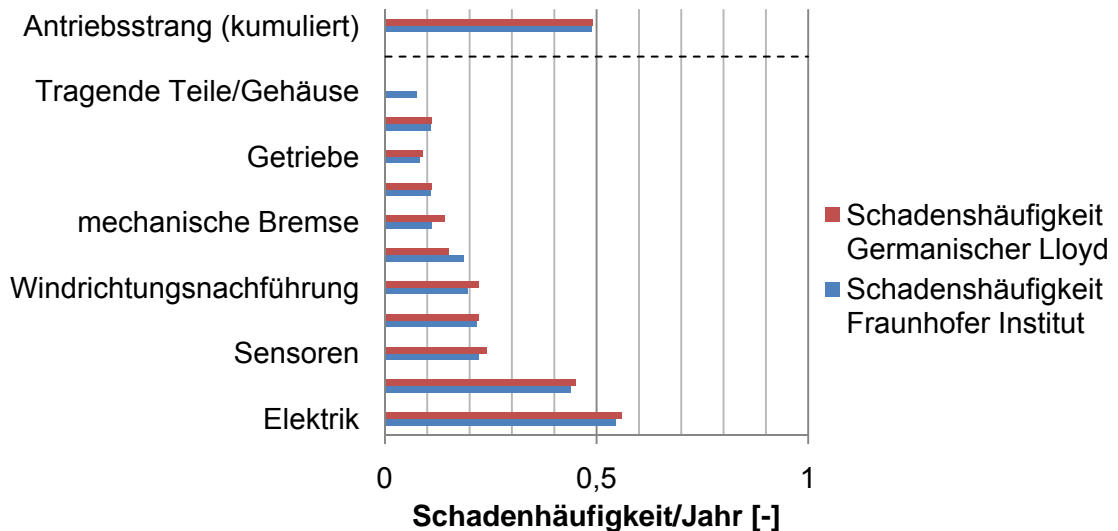


Bild 1: Schadenshäufigkeit von WEA-Komponenten [STG10, WEB10]

Aus dem Bild 2 geht hervor, dass die kumulierte Schadenshäufigkeit der Komponenten im Antriebsstrang (Getriebe, Rotornabe, Bremse) die zweithöchste jährliche Schadenshäufigkeit aufweist. Zusätzlich führt der Ausfall eines Teils des Antriebsstranges zu langen Anlagenausfallzeiten (s. Bild 3). So ist bei einem Getriebeschaden die Stillstandzeit der WEA im Durchschnitt 3,5 Mal länger als bei einem Schaden innerhalb der Elektrik. Bei diesen Komponenten ist die hohe Schadenshäufigkeit durch geringe WEA-Ausfallzeiten relativiert.

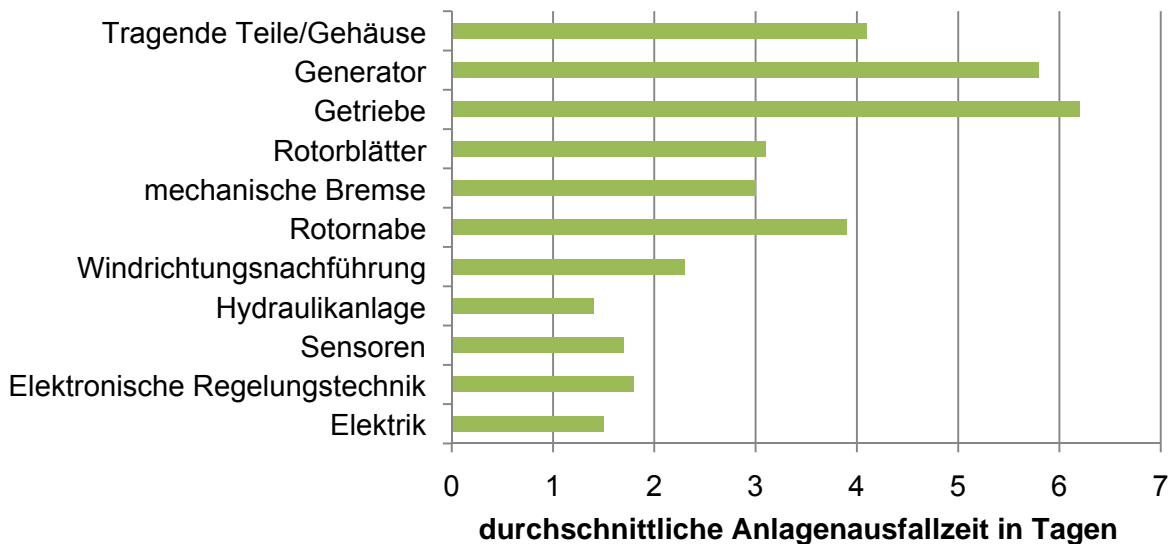


Bild 2: Anlagenausfallzeit in Abhängigkeit von WEA-Komponenten [WEB10]

Die Antriebsstrangkomponenten verursachen die längsten durchschnittlichen WEA-Ausfallzeiten und rufen in Kombination mit den jährlichen Schadenshäufigkeiten hohe Ertragsverluste für Anlagenbetreiber hervor: Ein Komponentenausfall innerhalb des Antriebsstranges führt zu WEA-Stillstandzeiten zwischen 3,8 und 6,2 Tagen [WEB10]. Aus diesem Grund kommt der Planung von Lagermengen für Komponenten des Antriebsstranges eine besondere Bedeutung zu und ist daher Ziel dieses Forschungsprojektes.

Im Offshore-Umfeld sind zusätzlich verlängerte Ausfallzeiten aufgrund der dort vorliegenden Randbedingungen, wie Wetter, Instandhaltungsressourcen, kundenspezifische Vereinbarungen und Personalspezifika, zu erwarten (s. Bild 4) [TRA11b].

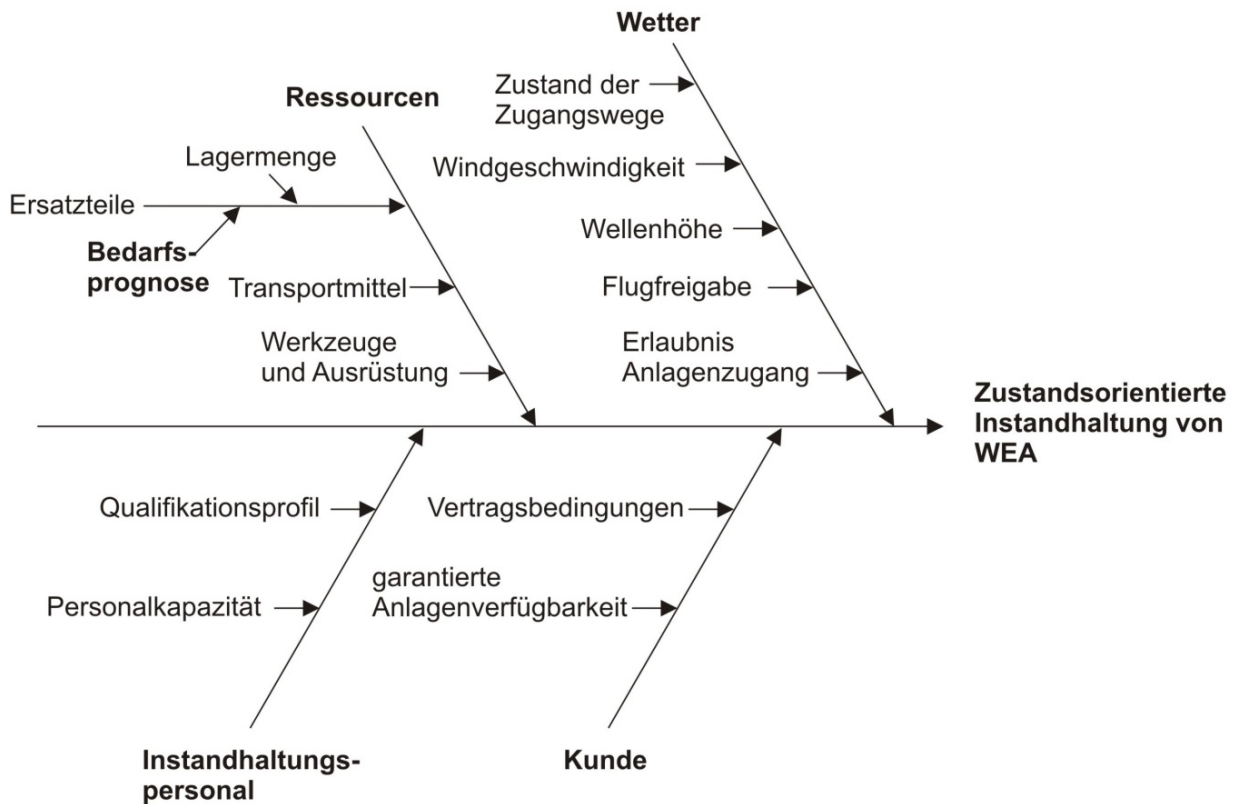


Bild 3: Randbedingungen bei der Instandhaltung von WEA [TRA11b]

Kontrakte mit Kunden beinhalten garantierte WEA-Verfügbarkeiten und ein Dienstleistungsspektrum das zwischen Anlagenbetreiber und Kunde vereinbart ist. Die Anlagenverfügbarkeit p ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass sich ein technisches System zu einem bestimmten Zeitpunkt in einem funktionsfähigen Zustand befindet [SCK10].

$$p = \frac{T_B}{T_B + T_A} \quad \text{Gl.(1)}$$

T_B Dauer während die Anlage funktionsfähig ist

T_A Dauer während die Anlage nicht funktionsfähig ist

p Wahrscheinlichkeit für die Funktionsfähigkeit der Anlagen

T_B bezeichnet die Dauer in der sich die Anlage in funktionsfähigem Zustand befindet, T_A die Dauer, in der die Anlagen nicht funktionsfähig ist. Bei Nicht-erreichen der garantierten Anlagenverfügbarkeit beeinflussen Konventionalstrafen die Kosten- und Ertragsstruktur für Dienstleistungsunternehmen. Für Instandhaltungsdienstleister resultiert aus den Vertragsbe-

dingungen ein Priorisieren von Aufträgen. Instandhaltungseinsätze werden in Folge dessen beschleunigt oder zurückgestellt.

Im Gegensatz zu innerbetrieblichen Instandhaltungsarbeiten sind für Instandhaltungsarbeiten an Offshore-Windenergieanlagen günstige Wetterbedingungen Voraussetzung. Windstärke und Wellenhöhe müssen unter Schwellwerten liegen, damit Schiffe die WEA noch ohne Gefährdung von Personal und Material erreichen können. Bei Helikoptereinsätzen ist zusätzlich gute Sicht für die Flugfreigaben erforderlich. Durch vorhandene Transportkapazitäten werden Personal, Werkzeuge, Ausrüstung und Ersatzteile zum Instandhaltungszeitpunkt zu den Anlagen transportiert [TRA11a]. Dabei stellen die Ersatzteile neben dem Instandhaltungspersonal, das die Instandhaltungsarbeiten an den WEA durchführt, eine Engpassgröße dar. Verschärft wird der Engpass durch die zunehmende Anzahl von Offshore Windenergieanlagen.

2.2.2 Verfahren zur Prognose von Bedarfen

Die Grundlage der Ersatzteillagerung bildet der Ersatzteilebedarf, der anhand von geplanten und stochastischen Ereignissen errechnet wird. Während ungeplante Bedarfe bei zufälligem Komponentenversagen auftreten, entstehen geplante Ersatzteilbedarfe im Rahmen revolvierender Instandhaltungsarbeiten. Die Herausforderung für KMU besteht in der Prognose stochastischer Bedarfe, da diese nicht langfristig planbar sind und unter Umständen hohe Prozess- und Ausfallfolgekosten verursachen.

Zur Prognose stochastischer Bedarfe ist eine Vielzahl von Ansätzen bekannt. Diese sind in vergangenheits- und lebenszeitzyklusmodellbasierte Prognoseverfahren unterteilt. Bei den erstgenannten Verfahren werden Ausfallereignisse im zeitlichen Verlauf betrachtet und mit Hilfe von Regressionsmethoden auf die zukünftige Bedarfshöhe und den Bedarfszeitpunkt extrapoliert [TEM06]. Das sporadische Auftreten von Bedarfen verhindert jedoch eine ausschließlich auf Vergangenheitsdaten gründende Bedarfsprognose.

Im Gegensatz zu Verfahren, die Bedarfe in Zeitreihen analysieren, ist mit Lebensdauermodellen eine Aussage über den zu erwartenden Zustand des betrachteten Systems möglich. Die Bedarfsmenge hängt von der Anzahl der betrachteten Ersatzteile und der zum Prognosezeitpunkt ermittelten Überlebenswahrscheinlichkeit ab. Zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit, dass ein technisches System einen bestimmten Zeitpunkt t überlebt, werden univariate Modelle, wie die Exponential- oder die Weibull-Verteilung eingesetzt [ESP54, ROS33]. Erstgenannte wird bei elektrischen und letztgenannte bei mechanischen Komponenten verwendet. Die Anwendung der Weibull-Funktion wird in der DIN IEC 61649 beschrieben und hat in der industriellen Anwendung eine weite Verbreitung [DIN08]. Verteilungsfunktionen, wie die logarithmische Normalverteilung oder die logistische Verteilung sind häufig im Bereich der Biologie anzutreffen und haben auf dem Gebiet der technischen Lebensdauerermittlung eine untergeordnete Bedeutung [KLE05].

Eine kombinierte Betrachtung der Zeitreihen- und Lebensdaueranalyse wird von Croston durchgeführt [CRO72]. Er geht davon aus, dass während eines betrachteten Zeitintervalls bei dem Großteil der Zeitpunkte t kein Materialbedarf vorliegt. Mathematisch ist das Phänomen des sporadischen Bedarfs von Croston durch zufällige Abstände zwischen zwei Bedar-

fen und eine zufällige Bedarfshöhe beschrieben. Die Häufigkeit und die Höhe des Bedarfs werden durch den Berechnungsalgorithmus in Abhängigkeit von historischen Daten und aktuellen Parametern adaptiert. Dazu werden die exponentielle Glättung sowie die Wahrscheinlichkeitsrechnung eingesetzt [CRO72]. So hat Sebastian mit Hilfe des Verfahrens sehr gute Prognosen für Ersatzteilbedarfe erstellt [SEB06].

Alle genannten Modelle unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeitsfunktion $S(t)$ und somit auch hinsichtlich ihrer zeitabhängigen Ausfallrate $h(t)$. Sie beschreibt zu einem beliebigen Zeitpunkt t das Risiko für einen Ausfall des Systems. Die technischen Eigenschaften der Ersatzteile im Antriebsstrang entscheiden über die Eignung der Funktion zur präzisen Prognose: Je besser eine Funktion die Ausfallcharakteristik eines Ersatzteils beschreibt, umso genauer kann der Ausfallzeitpunkt bestimmt werden. Deshalb erfolgt eine Aufnahme und Analyse der Lebensdauermodelle in Verbindung mit den Ersatzteilen des Antriebsstranges im Verlauf des Projektes. Damit ist eine solide Basis für die Lagermengenbestandsplanung gegeben.

2.2.3 Lagermengenbestandsplanung

Während Ansätze für die Planung von Ersatzteillagermengen auf der Basis von Lagerhaltungs- und Kapitalbindungskosten verbreitet sind, finden sich für die Berücksichtigung der Bedeutung einzelner Ersatzteile für die gesamte Anlagenverfügbarkeit nur wenige Arbeiten [DEK98, STZ09, SEB06]. Weiterführende Ersatzteilversorgungsansätze betrachten die Ersatzteilversorgung im Zusammenhang mit dem Instandhaltungsprozess von Werkzeugmaschinen. Diese Betrachtungsweise führt zu einer erhöhten Genauigkeit der Prognose und damit zu kostenoptimierten Materialbeständen [LIA10, VAU05, WAN11].

Zur Ermittlung eines wirtschaftlichen Materialbestandes verfolgt Stolletz einen Ansatz, der die Kosten einer nicht produktiv arbeitenden Maschine mit den Aufwendungen für die Lagerhaltung vergleicht. Dazu werden unterschiedliche Szenarien simuliert, die standortabhängige Kostenparameter enthalten, um den Anforderungen unterschiedlicher Maschinenstandorte gerecht zu werden. Überdies sind Kapitalbindungskosten, Deckungsbeitrag und eine schwankende Komponentenlebensdauer, ausgehend von der MTBF (Mean Time Between Failure), der durchschnittlichen Zeit zwischen zwei Ausfällen, abgebildet. Die Bestandsermittlung erfolgt mit Hilfe von Szenarioanalysen [STZ09].

Ebenso ist im Rahmen des Projektes "Dynamische Gestaltung von Ersatzteilsystemen: Entwicklung eines ganzheitlichen Ansatzes unter integrierter Betrachtung von Prognoseverfahren, Netzwerkstrukturen und Bestandspolitiken" ein Ersatzteilversorgungskonzept für Ersatzteile, das neben der Prognose, die Standortwahl und die Lagermengenbestimmung beinhaltet, entwickelt worden [SEB06]. Die Ergebnisse hinsichtlich geeigneter Prognoseverfahren stellen eine Basis für die in diesem Projekt angestrebten Untersuchungen dar, wenngleich die veränderte Datenbasis und die Berücksichtigung technischer Interdependenzen eine Überprüfung erfordern. Beide Ansätze gehen von intralogistischen Bedarfen aus, die unabhängig von existierenden Restriktionen bedient werden können. Die Bestandsplanung unter

der Berücksichtigung der Instandhaltung und den damit einhergehenden Restriktionen finden keine Aufnahme in den Untersuchungen.

Die kombinierte Betrachtung von Instandhaltungsprozess und Ersatzteillagerhaltung führte bei einer Vielzahl von Forschungsarbeiten zu Verbesserungen innerhalb der Bedarfsprognose [LIA10, VAU05, WAN11]. Neben stochastischen Bedarfen verwendet Wang Bedarfsmengen, die bei geplanten Instandhaltungsmaßnahmen erforderlich sind und erzielt im Vergleich zu bekannten Ansätzen eine verbesserte Prognosegüte [WAN11]. Die Instandhaltungsplanung unter Beachtung der ermittelten Restlebensdauer erlaubt dabei die Terminierung der Instandhaltungstätigkeit zum kostenminimalen Ersatzteiletausch. Liao und Vaughan verwenden zur Mengenbestimmung neben Instandhaltungs- auch Ersatzteil- und Mindermengenkosten. Diese Kostenerfassung ermöglicht den Autoren die Verringerung der Gesamtkosten der Instandhaltungsprozesse von Werkzeugmaschinen [LIA10, VAU05]. Auch wenn die Methoden die Abbildung der komplexen Instandhaltungsprozesse und der eingeschränkten Zugänglichkeit von Offshore-WEA nicht abbilden können, stellt die Herangehensweise der Zusammenführung von Instandhaltungsprozess und Ersatzteillagerhaltung einen wichtigen Ansatz dar, der im Verlauf dieses Projektes aufgenommen wird.

Eine Methode, die auf der Basis der Funktionsfähigkeit eines Ersatzteils auf die Verfügbarkeit einer Maschine schließt und damit die Bedeutung des Ersatzteils quantifiziert wird von Dekker realisiert. Er berücksichtigt die Bedeutung von Ersatzteilen für die Verfügbarkeit der Anlage anhand eines erhöhten Servicegrades SG ausgewählter Ersatzteile [DEK98]. Der Servicegrad bezeichnet die Fähigkeit eines Lagers, Bedarfsanfragen zu befriedigen und beschreibt die Leistungsfähigkeit des Lagers [NYH03].

$$SG = \frac{m}{n} \quad \text{Gl. 3.1}$$

SG	Servicegrad
m	pünktlich bediente Nachfragen
n	gesamte Anzahl der Nachfragen

Der Servicegrad ist für redundant und exklusiv vorhandene Ersatzteile differenziert. Die vorgestellte Methode erlaubt das Einrichten verschiedener Servicegrade für ein Ersatzteil, das in unterschiedlichen Maschinen und Anlagen eingesetzt wird [DEK98]. Mit Hilfe eines Simulationsmodells wird die Lagerhaltungsstrategie für sowohl kritische als auch nicht kritische Materialbedarfe betrachtet. Durch die untersuchte Lagerhaltungsstrategie, in der ein festgelegter Anteil kritischer Geräte für dringende Materialbedarfe blockiert ist, haben die Autoren im Vergleich zu einer nicht differenzierten Betrachtung der Bedarfe, verbesserte Ergebnisse hinsichtlich des tatsächlichen Servicegrades erzielt. Für die Windenergiebranche ist dieser Ansatz von Interesse, da die Verfügbarkeit der WEA stark abhängig von den Ersatzteilen des Antriebsstranges ist. Durch eine Modifikation der vorgestellten Methode kann ein kumulierter

Servicegrad eines Ersatzteils ermittelt werden, der den Anforderungen heterogener WEA-Parks gerecht wird.

2.2.4 Randbedingungen bei der Instandhaltung von Offshore-WEA

Die Ausführung von Instandhaltungsarbeiten und der Aufbau von Offshore-WEA werden durch variierende Umgebungsbedingungen im Offshore-Umfeld erschwert. Daher haben verschiedene Arbeiten der jüngeren Vergangenheit aufgrund zunehmender Verbreitung von Offshore-WEA die Quantifizierung von Umgebungsbedingungen zum Inhalt [SHT10, KOV11, SCH11, NIE11, NIL05]. Bisher bekannte Verfahren eignen sich zum Erstellen von Einsatzplänen und Versorgungsketten, ermöglichen aber keine Ersatzteilplanung.

Die Errichtung von Windenergieanlagen im Offshorebereich analysieren Scholz-Reiter und Schütt [SCH11, SHT10]. Die Parameter mit dem größten Einfluss sind ungünstige Wetterbedingungen sowie niedrige Verfügbarkeit von Transportmitteln, welche die Errichtung der WEA unmöglich machen können. Die Autoren führen eine Terminplanung für den Aufbau von WEA unter Berücksichtigung der Wettereinflüsse durch, in dem sie unterschiedliche Wetterbedingungen in Klassen unterteilen und mit ganzzahligen Kennzahlen versehen. Die Nutzung des dadurch erzeugten Terminplans vermeidet Ressourcenengpässe bei der Installation eines Windparks.

Nilsson und Nielsen nutzen aus anderen Branchen bekannte Instandhaltungsstrategien für die Instandhaltungsplanung von WEA und entwickeln daraus einen Mixed Integer Ansatz. Die Autoren erstellen Instandhaltungspläne auf Grundlage numerischer Ergebnisse. Daten der Zustandsüberwachung, Instandhaltungs- und Produktionsausfallkosten gehen in diese Instandhaltungspläne ein. Die Produktionsausfallkosten werden auf Basis von Windgeschwindigkeiten der Vergangenheit und der Leistungskurve der WEA bestimmt. [NIE11, NIL05]. Die Methode von Manwell ermöglicht die Berechnung von Windgeschwindigkeiten und der Wellenhöhe bei Offshore-WEA, indem Messwerte von Wetterstationen an Land extrapoliert werden, da Daten für die zukünftigen Offshore-Standorte der WEA fehlen [MAN07]. Verteilungsfunktionen zur Vorhersage von Windgeschwindigkeiten und Leistungsabgabe untersuchen Morgen et al. Die Verteilungsfunktionen erzielen in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen unterschiedliche Genauigkeiten bei der Vorhersage. Für die Windgeschwindigkeiten und die Leistungsabgabe der WEA müssen unterschiedliche Verteilungen zugrunde gelegt werden, da diese nicht direkt miteinander zusammenhängen. Korrektive und zustandsbasierte Instandhaltungseinsätze vergleicht Nielsen unter Berücksichtigung der im Offshore-Bereich anzutreffenden Randbedingungen [NIE11]. Die zur Instandhaltung erforderlichen Ressourcen integriert Kovács und erweitert aus der Produktion übertragenen Instandhaltungsmethoden um vorherrschende Wetterbedingungen.

Alle Methoden berücksichtigen neben den erwarteten Wetterbedingungen auch die Informationen über die Ressourcenverfügbarkeit zur Terminierung der Instandhaltungstätigkeiten sowie zur Gestaltung der Versorgungskette bei der Errichtung von Windparks. In diesem Projekt wurde erstmals eine dynamische Ersatzteilbestandsplanung unter Einbeziehung von quantifizierten Randbedingungen im Offshore-Bereich realisiert.

2.3 Forschungsziel

2.3.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Ziel des Forschungsprojekts ist, eine Methode zur dynamischen Lagerbestandsplanung für Ersatzteile des Antriebsstrangs von Offshore-WEA zu entwickeln. In der Methode werden die Parameter, die die Zugänglichkeit von Offshore-WEA beeinflussen, die technischen Abhängigkeiten und das breite Variantenspektrum der Ersatzteile des Antriebsstrangs berücksichtigt. Es gehen sowohl die meteorologischen Bedingungen mit Windgeschwindigkeiten und Wellenhöhen als auch die Verfügbarkeit von Schiffen, Helikoptern und Personal in die Berechnung ein. Durch Sicherstellung einer zuverlässigen Ersatzteilversorgung wird die entwickelte Methode zu einer hohen Anlagenverfügbarkeit und sicheren Stromversorgung beitragen.

Aufgrund des Instandhaltungseinsatzes, welcher einem Ersatzteilbedarf folgt, existiert eine Abhängigkeit zwischen Anlagenzugänglichkeit und Ersatzteillagerbestand. Da eine Ersatzteilanfrage erst bei Zugänglichkeit einer WEA kritisch wird, können Bestände in Zeitintervallen geringer Zugänglichkeit reduziert werden. In diesem Forschungsprojekt werden daher Randbedingungen des Offshore-Felds untersucht und zur Realisierung einer dynamischen Sollbestandsermittlung genutzt. Der ermittelte Lagersollbestand ist kostenoptimal unter Berücksichtigung von Lagerbestandskosten, Ausfallfolgekosten und erwarteten Erträgen. Die Ausfallfolgekosten werden aus der durchschnittlichen Anlagenverfügbarkeit, der zum Zeitpunkt des Ausfalls vorliegenden meteorologischen Bedingungen sowie der Ressourcenverfügbarkeit ermittelt. Die Anlagenverfügbarkeit ergibt sich aus technischen Interdependenzen der Ersatzteile des Antriebsstrangs sowie den zugehörigen Ausfallwahrscheinlichkeiten.

2.3.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Bisherige Ersatzteilversorgungsansätze gehen von einer Lagerbestandsplanung aus, die ausschließlich auf der Bedarfsprognose gründet. Eine kombinierte Betrachtung aus den bei der Ersatzteilversorgung beteiligten Prozessen, wie der Instandhaltung, erlaubt die Erweiterung bestehender Ansätze. Dadurch verändern sich die bei der Lagermengenplanung zu beachtenden Bedarfe, die in einen dynamischen Lagerbestandsverlauf überführt werden können. Die Innovation der entwickelten Methode beinhaltet die Aufnahme der bei der Instandhaltung auftretenden Randbedingungen und die Nutzung dieser im Sinne einer Wirtschaftlichkeitssteigerung der Ersatzteilbedarfsmengenbestimmung, ohne die WEA-Verfügbarkeit zu gefährden. Die Herangehensweise, Stör- und Einflussgrößen zur Sollbestandsermittlung zu verwenden ist neuartig und erlaubt Wirtschaftlichkeitssteigerungen, die mit bekannten Methoden nicht erreichbar sind.

Unter Berücksichtigung der technischen Interdependenzen, ist ferner eine neuartige Abbildung der Anlagenstruktur möglich, sodass Prognosen verbessert und der hohen Variantenvielfalt Rechnung getragen werden können.

Für KMU der Windenergiebranche bietet sich auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse und unter Verwendung des zu entwickelnden Verfahrens großes wirtschaftliches Potenzial,

da die Bestandsplanung in Abhängigkeit der Anlagenzugänglichkeit dynamisch stattfindet. Hierdurch wird Unternehmen der Branche die Möglichkeit einer wirtschaftlicheren Ersatzteilplanung bei gleichbleibendem Servicegrad gegeben.

3 Ergebnisse

3.1 AP 100 Analyse des Antriebstranges

3.1.1 AP 110 Systemgrenzen- und Funktionsidentifikation

Ziel

AP 110 umfasst die Analyse des Antriebsstranges einer ausgewählten WEA. Mit Hilfe von Konstruktionszeichnungen und Expertengesprächen werden die relevanten Komponenten des Antriebsstranges und die technischen Abhängigkeiten der Baugruppen untereinander identifiziert. Durch die Analyse werden die Systemgrenzen des Antriebsstranges für die weiteren Untersuchungen festgelegt. Die Feststellung der konstruktiven Abhängigkeiten und Funktionsgruppen ermöglicht die Planung der Komponentenwechsel und Lagerhaltung für Ersatzteile. Konstruktive Abhängigkeiten wirken sich auf die Bedarfsmengen im Servicenetzwerk aus: Beispielsweise kann bei einem Wälzlagerschaden der Tausch der Antriebswelle erforderlich sein, weil der Lieferant das Wälzlager nur vormontiert auf der Welle bereit stellt. In diesem Fall muss die gesamte Baugruppe, bestehend aus Welle mit vormontiertem Wälzlager, im Ersatzteillager vorrätig sein.

Durchgeführte Arbeiten

Im Projekt EloWind wird aufgrund des Engagements und der Interessenlage des PA der Antriebstrang einer Onshore-Windenergieanlage des Typs GE TW 1.5 untersucht. Die Analysen der Umgebungsbedingungen berücksichtigen jedoch auch die Spezifika der Offshore-Industrie. Der Antriebstrang ist als aufgelöste Bauweise ausgeführt. Das heißt, dass das Hauptlager getrennt von dem Getriebe vorliegt. Das folgende Bild zeigt den Antriebstrang und die enthaltenen Komponenten schematisch. Die Rotorblätter nehmen die kinetische Energie auf und leiten diese über die Hauptwelle an das Getriebe (A) weiter. Dort wird die Drehzahl erhöht und über die schnelle Welle und die Bremse (B) über die Kupplung (C) an den Generator (D) weitergegeben. Dieser wandelt die kinetische in elektrische Energie, welche von einem Umrichter auf die Netzspannung transformiert wird.

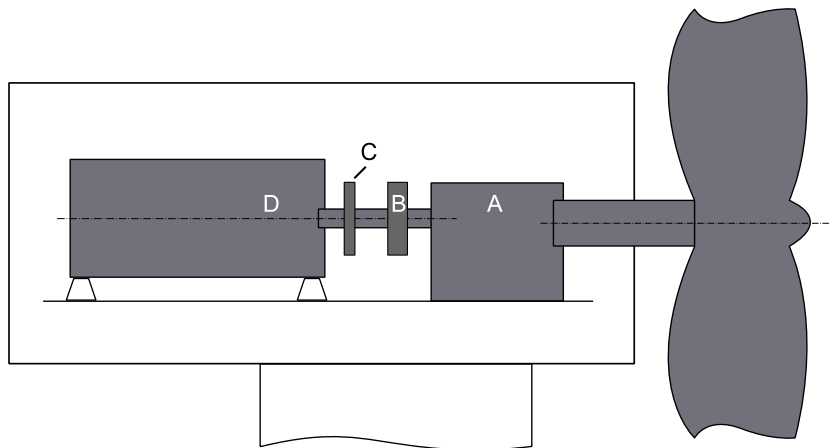


Bild 4: Antriebstrang einer WEA

Ergebnisse

Die Funktion der im Antriebstrang enthaltenen Komponenten bestimmt deren Belastung und deren Bedeutung für den Betrieb der Windenergieanlage. Durch die Funktionsanalyse sind technische Abhängigkeiten identifizierbar. Die Abhängigkeiten können ferner durch die Analyse vergangener Bedarfsmengen validiert werden. Dazu finden die Daten der im Projekt beteiligten Firmen Anwendung. Durch eine Funktionsanalyse sind die folgenden Funktionen des Antriebstranges identifiziert:

- Drehmoment übertragen/ trennen
- Energie übertragen
- Kräfte aufnehmen
- Filter-, Kühl-, Heizfunktion
- Hilfsfunktion
- Sichtschutz

Alle Funktionen müssen erfüllt werden, um den Betrieb der Anlage zu gewährleisten. Als Ausnahme ist der Sichtschutz zu betrachten. Die Nichterfüllung dieser Funktion verhindert nicht den Betrieb der Anlage. Da keine der Komponenten bei der betrachteten Onshore-WEA redundant vorhanden ist, muss die stetige Funktionsbereitschaft aller Komponenten im Antriebstrang gewährleistet sein.

3.1.2 AP 120 Bestimmung kritischer und redundanter Komponenten

Ziel

In AP 120 wird die Bedeutung der in AP 110 identifizierten Ersatzteile und Baugruppen für die Gesamtverfügbarkeit der WEA bestimmt. Kritische Komponenten führen bei einem Ausfall zum Stillstand der WEA und verursachen dadurch hohe Ausfallfolgekosten. Ein Beispiel ist der Bruch eines Zahnrads im Getriebe. Nicht kritische Komponenten, wie redundant vorhandene Azimutantriebe oder Ölfilter, beeinträchtigen den Betrieb der WEA dagegen nicht unmittelbar. Sie gehen bedingt in die Berechnung der Anlagenverfügbarkeit mit ein (AP 400).

Durchgeführte Arbeiten

Die Grundlage der Ersatzteilbestandsplanung stellt die Klassifizierung der Ersatzteile dar. Neben dem Komponentenpreis und der Ausfallcharakteristik ist die Bedeutung für den Anlagenbetrieb ein entscheidendes Klassifizierungsmerkmal. Die durchgeführten Expertengespräche haben gezeigt, dass jedes Verschleißteil und die damit in Verbindung stehenden Ersatzteile, wie Befestigungsmaterial oder Schmiermittel kritisch für den Anlagenbetrieb sind. Bauteile die eine Sichtschutzfunktion erfüllen, wie Abdeckungen sind als unkritische Ersatzteile zu klassifizieren.

Weitere Klassifizierungsmerkmale sind der **Preis** und die **prognostizierte Lieferzeit** des Ersatzteils. Letztgenanntes Kriterium geht mit der Verfügbarkeit des Ersatzteils am Markt einher. Die Lieferzeit der Komponente ist insofern von Bedeutung, als das der innerhalb der Lieferzeit auftretende Bedarf die Lagermenge bestimmt (Lead Time Demand). Diese Kenngröße wird in Arbeitspaket 400 zur Lagermengenbestimmung verwendet werden.

Für die Prognose und Planung von Ersatzteilen ist deshalb zunächst die Bedeutung der Ersatzteile für die Anlageverfügbarkeit festzustellen und anschließend eine Klassifizierung hinsichtlich der Bedarfsart und deren Eigenschaften durchzuführen. Das folgende Bild verdeutlicht das Vorgehen. Bei der Einordnung zu Preis- und Wiederbeschaffungspreiskategorien wird die ABC- oder Pareto-Analyse angewendet [BIE08].

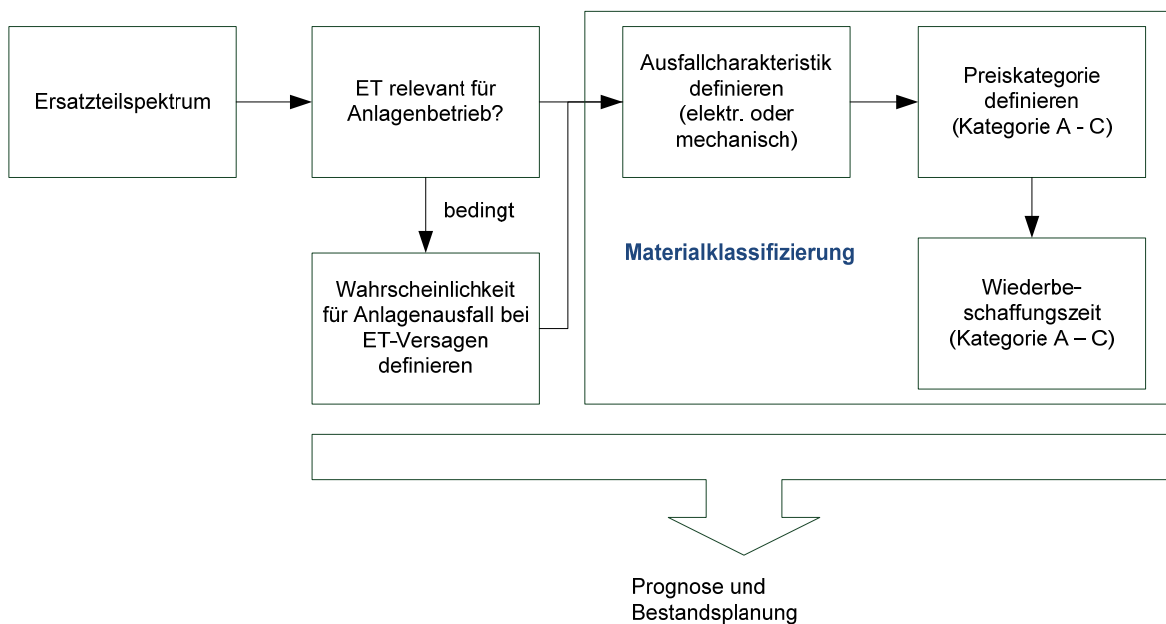


Bild 5: Klassifizierung des Ersatzteilspektrums

Die Zuordnung der Ausfallcharakteristik ist für die Auswahl einer geeigneten Zuverlässigkeitsfunktion notwendig. Bei elektrischen Bauteilen wird ein exponentielles Ausfallverhalten und bei mechanischen Bauteilen ein weibullverteiltes Ausfallverhalten unterstellt.

Ergebnisse

Technische Interdependenzen

Technische Interdependenzen herrschen z.B. zwischen den Hauptbaugruppen Generator oder Getriebe und dem verwendeten Befestigungsmaterial, wie Schrauben, Bolzen und Muttern. Ferner kommen Abhängigkeiten hinzu, die durch den Austausch Aufwand für das Getriebe zu begründen sind. Bei dem Tausch des Getriebes wird z.B. das Hauptlager mit ausgetauscht, weil die Komponenteninstandhaltung nicht an der WEA sondern in der Werkstatt durchgeführt wird und der Tausch des, im Verhältnis zum logistischen Aufwand, relativ günstigen Hauptlagers in der Werkstatt mit geringem Aufwand vollzogen werden kann.

Die Tabelle 2 zeigt die mit dem Primärbedarf Getriebe entstehenden Ersatzteilbedarfe.

Tabelle 1: Bedarfe durch technische Interdependenzen

Primärbedarf	hervorgerufene Bedarfe	Menge
Getriebe oder Hauptlager	Schraubenbolzen; M36x250	44 St.
	Skt.-Mutter; M36-10 h=3	44 St.
	Scheibe 37, Delta-MKS	44 St.
	Rotorwelle TW1.5s	1 St.
	Arretierungsbock,	1 St.
	Bremse inkl. Hydraulik	1 St.
	Bolzen/Muttern Stehlager	1 St.
	Bolzen Hauptlager	1 St.
	Spannsatz Getriebe	1 St.
	Bremsbeläge	1 St.

Ein Getriebe oder Lagerwechsel kann ohne die in der Tabelle aufgeführten Ersatzteile nicht durchgeführt werden. Die Schraubenbolzen sind keine Verschleißteile, wie beispielsweise das Getriebe oder das Hauptlager, dennoch korreliert der Bedarf dieser Ersatzteile mit dem des Primärbedarfproduktes. Der zu entwickelnde Prognosealgorithmus sollte diese Abhängigkeiten mit abbilden, um Reparaturzeiten minimieren zu können.

3.2 AP 200 Bedarfsprognose für Ersatzteile

Die Bedarfsprognose ist die Grundlage für die in AP 400 dynamisch zu ermittelnde Lagermenge. Bei der Instandhaltung von Maschinen und Windenergieanlagen entstehen Bedarfe durch deterministische und stochastische Ereignisse. In diesem Arbeitspaket wird daher eine Methode entwickelt, die beide Bedarfsarten bei der Ersatzteilversorgung von WEA berücksichtigt.

3.2.1 AP 210 Deterministische Bedarfe

Ziel des Arbeitspakets 210 ist die Ermittlung von deterministischen Bedarfen auf der Grundlage von Instandhaltungsintervallen der WEA.

Durchgeführte Arbeiten

Zur Beurteilung deterministischer Bedarfe sind Experteninterviews, Datenanalysen und die Auswertung von branchenspezifischer Fachliteratur durchgeführt worden.

Ergebnisse

Wie in AP 100 dargelegt erfolgt die wiederkehrende Wartung von WEA in fest definierten Intervallen. Unternehmensübergreifende Regelwerke, z.B. die Richtlinien zur Instandhaltung von WEA der Firma Germanischer Lloyd sowie anlagenherstellergebundene Vorgaben schreiben wiederkehrende Komponentenwechsel vor. Durch ein fortwährendes Erfassen der Betriebsstunden können deterministische Bedarfe prognostiziert und entsprechende Lagermengen vorrätig gehalten werden.

Die deterministischen Bedarfe ergeben sich aus den Wartungsintervallen der Windenergieanlagenhersteller. Bauteile, die zu bestimmten Intervallen getauscht werden müssen, sind als solche zu klassifizieren, sodass der passende Prognosealgorithmus angewendet werden kann. Im Betrachtungsobjekt sind beispielsweise folgende Komponenten regelmäßig zu wechseln:

Bauteil	Austauschintervall
Getriebeöl	Alle 36 Monate
Ölschläuche	Alle 36 Monate
Luftfilter	Alle 12 Monate

Die festen Austauschintervalle lassen eine deterministische Prognose zu. Zu berücksichtigen ist jedoch bei allen Komponenten, dass ein Tausch auch zustandsorientiert stattfinden kann. Der Zustand der Komponente wird durch das Wartungspersonal bei der präventiven Instandhaltung der WEA festgestellt. Deshalb ist auch in der deterministischen Bedarfsprognose ein stochastischer Anteil zu berücksichtigen. Die Prognosealgorithmen sind in AP 210 dargestellt.

Die Gleichung 3.1 zeigt die Berechnung von Materialien, deren Austauschintervall in Betriebsstunden vorgeschrieben ist. Neben dem deterministischen ist auch ein stochastischer Anteil enthalten, der durch die Normalverteilung beschrieben ist. Deren Parameter σ und μ sind mit realen Daten zu validieren.

$$B = (I \times N \times P_{WEA}) \quad \text{Gl. 3.1}$$

B Bedarfsmenge im Prognoseintervall

I Wechselintervall

P_{WEA} Menge der Ersatzteile pro WEA

N Anzahl der WEA

3.2.2 AP 220 Stochastische Bedarfe

Ziel des AP 220 ist die Berechnung stochastischer Bedarfe auf der Basis existierender Berechnungsmethoden. Dazu zählen sowohl zeitreihenanalytische als auch statistische Ansätze.

Durchgeführte Arbeiten

Zur Zielerreichung sind die häufigsten zeitreihenanalytischen Prognosemethoden programmiert und getestet worden. Überdies sind diese in ein plattformunabhängiges Prognosewerkzeug eingeflossen.

Ergebnisse

Prognoseverfahren für schwankende Bedarfe

Im Bereich der Ersatzteilbedarfsprognose sind stark schwankende Bedarfsmengen eine Herausforderung. Schwankende Bedarfe sind beispielsweise gekennzeichnet von aufeinanderfolgenden Perioden, in welchen kein Bedarf auftritt. Auf eine Vielzahl von Null-Bedarfsperioden folgt dann eine Periode mit einem oder zwei Bedarfen. Klassische Prognoseverfahren für Bedarfe sind für die Bedarfe stark schwankender Bedarfe (engl. lumpy Demand) wenig geeignet, da die prognostizierten Bedarfsmengen meist über den tatsächlich auftretenden Verbräuchen liegen. Damit sind die Lagerhaltungskosten höher als erforderlich.

Im Folgenden werden die aus der Literatur bekannten Verfahren zu einer Bedarfsprognose zusammengefasst und deren notwendigen theoretischen Hintergrund dargestellt. Hierbei werden zwei mögliche Ansätze verfolgt:

1. Zeitreihenanalyse
2. Statistische Analyse

Zeitreihenanalyse

Bei der Zeitreihenanalyse wird je nach dem Trend historischer Daten ein geeignetes Verfahren ausgewählt. Hierbei wird grundsätzlich zwischen drei möglichen Trendverläufen unterschieden [THO05]:

1. Konstantes Niveau: Nachfrage pendelt sich um ein konstantes Niveau ein
 - a) Gleitender Durchschnitt
 - b) Gewichteter gleitender Durchschnitt
 - c) Einfache exponentielle Glättung
2. Trend: In der Nachfrage ist eine zeitabhängige Entwicklung zu erkennen (z.B. tendenziell linearer Verlauf)
 - a) Regressionsanalyse
 - b) Doppelte exponentielle Glättung
3. Saisonalität: Nachfrage durchläuft periodisch Nachfrage-Tiefen und –Spitzen
 - a) Dreifache exponentielle Glättung

Die Prognoseverfahren sind im Rahmen der Funktionsbeschreibung des entwickelten Prognosetools in Kapitel 8 näher beschrieben, um die Auswirkung der Prognoseparameter beurteilen zu können.

Zuverlässigkeitsanalyse

Zur Berechnung stochastischer Bedarfe, eignen sich sowohl diskrete als auch stetige Verteilungsfunktionen. Zur Vorhersage seltener Ereignisse ist, unter der Voraussetzung der Unabhängigkeit der zu untersuchenden Ereignisse, die Binomialverteilung geeignet. Da die zu prognostizierenden Bedarfe in unterschiedlichen Windenergieanlagen auftreten, ist deren Unabhängigkeit gegeben. Sobald die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Ereignisses (z.B. Ausfall einer Komponente) sehr klein und die Stichprobenanzahl n sehr groß wird, darf die Binomialverteilung mit der Poissonverteilung approximiert werden. Deshalb sind im Folgenden sowohl die Binomialverteilung als auch die Poissonverteilung zur Prognose stochastischer Ersatzteilbedarfe dargestellt. Die Poissonverteilung ist ein Spezialfall innerhalb der Erneuerungstheorie. In dieser wird davon ausgegangen, dass ein ausgefallenes System mit einem neuen System ersetzt wird und dessen Lebensdauer von neuem beginnt. Innerhalb eines Poissonprozesses ist weiterhin die Randbedingung vorhanden, dass das Ausfallverhalten des betrachteten Systems unabhängig von der Zeit und unabhängig von dessen Alter ist. Daher eignet sich diese Verteilung für elektronische Komponenten, die keinem Verschleiß sondern Zufallsausfällen ausgesetzt sind.

Dichte- und Verteilungsfunktion

Verteilungsfunktionen werden aus Daten vergangener Bedarfe erzeugt und sind dazu geeignet, die Lebensdauer einer Komponente zu beschreiben. Das technische Ausfallverhalten determiniert daher den Prognosealgorithmus. Dazu wird die in der Vergangenheit aufgetretene Bedarfshöhe mit der zugeordneten Komponentenlebensdauer in ein Histogramm eingezeichnet. Durch Verbinden der Histogramme entsteht die Dichtefunktion. Diese beschreibt die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls zu dem betrachteten Zeitpunkt. Gleichung 3.1 zeigt die

Dichtefunktion der Exponentialverteilung mit dem Formparameter γ , der die Anzahl der Ereignisse pro Zeitintervall angibt [DIE09].

$$f(t) = \gamma \cdot e^{-\gamma t} \quad \text{Gl. 3.2}$$

$f(t)$ Dichtefunktion

γ Formparameter

Die Verteilungsfunktion repräsentiert die Wahrscheinlichkeit für das Versagen einer Komponente von Beginn der Inbetriebnahme bis zum Zeitpunkt t und wird durch Integration der Dichtefunktion berechnet (Gleichung 3.3).

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx = 1 - e^{-\gamma t} \quad \text{Gl. 3.3}$$

$F(t)$ Verteilungsfunktion

Das Komplement der Verteilungsfunktion ist die Überlebensfunktion. Sie stellt die Wahrscheinlichkeit für das Überleben der Komponente bis zum Zeitpunkt t dar. (s. Gleichung 3.4)

$$S(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx = e^{-\gamma t} \quad \text{Gl. 3.4}$$

$S(t)$ Überlebensfunktion

Durch die Dichte- und die Verteilungsfunktion lässt sich eine weitere Kenngröße, die Ausfallrate einer Lebensdauerverteilung, berechnen. Sie gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass die Komponente im nächsten Zeitintervall Δt ausfällt, unter der Voraussetzung bis zum Zeitpunkt t überlebt zu haben. (s. Gleichung 3.5) [HAR09]

$$h(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \gamma \quad \text{Gl. 3.5}$$

Zur Ersatzteilprognose können die Ausfallverteilungen innerhalb stochastischer Prozesse oder unter Berücksichtigung definierter Grenzwerte eingesetzt werden. Im letztgenannten Fall können Austauschvorgänge bei Erreichen einer definierten Grenzausfallwahrscheinlichkeit angestoßen werden. Stochastische Prozesse modellieren hingegen den Bedarfsentstehungsprozess unter der Annahme, dass das Erreichen des Lebensdauerendes einer Komponente einen Ersatzteilbedarf hervorruft, sofern das Primärprodukt länger als die ausgefallene Komponente betrieben werden soll und die Komponente ersetzt wird. In der Literatur ist dieses Ersetzen einer Komponente als Erneuerungsprozess bekannt. Sobald eine Komponente durch eine gleichwertige ersetzt wird und die Leistungsfähigkeit des neuen Gerätes der Leistungsfähigkeit des alten Gerätes entspricht handelt es sich um einen einfachen Erneuerungsprozess. Der Erneuerungsprozess erlaubt die Kalkulation der mittleren Anzahl zu erwartender Ausfälle während eines definierten Zeitintervalls. [SCK10]

Das Bild 6 zeigt einen einfachen Erneuerungsprozess ohne Reparaturzeit. Es verdeutlicht, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit des neuen Gerätes ebenso wie des alten Gerätes verläuft. Stillstandzeiten aufgrund von Reparaturzeiten fallen in dem idealisierten Modell nicht an. Für die Ersatzteilplanung werden die Stillstandzeiten berücksichtigt und in Form von Ausfallkosten in die Lagermengenberechnung eingehen. Der Verlauf der in Bild 12 gezeigten Überlebensfunktion ist stark von der Ausfallcharakteristik abhängig, die der zu betrachtenden Komponente zugrunde liegt. Die beiden in der Zuverlässigkeitsprognose am häufigsten differenzierten Verteilungsfunktionen sind die Exponential- und die Weibullverteilung. Diese sind nachfolgend detailliert dargelegt und mit dem Erneuerungsprozess verknüpft.

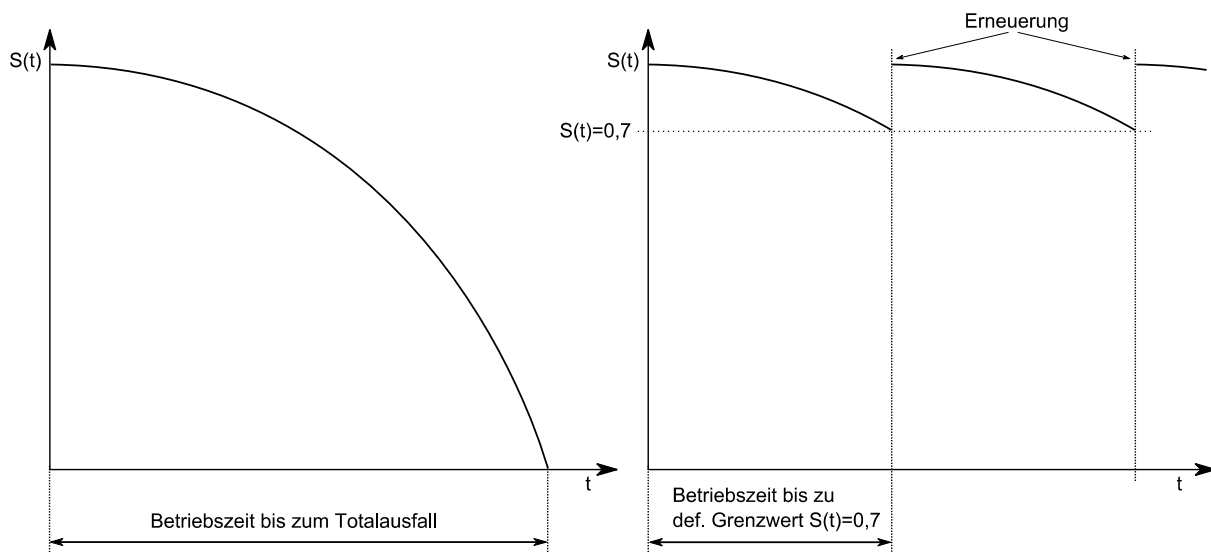


Bild 6: Erneuerungsprozess

Elektronische Komponenten

Poisson-Verteilung

Voraussetzung für die Verwendung der Poissonverteilung ist, dass bekannt ist wie hoch die im Mittel zu erwartende Anzahl von Ereignissen in einem bestimmten Intervall ist. Die Poissonverteilung ist gedächtnislos, d.h. dass z.B. das Alter der Anlagen und Ersatzteile nicht relevant für die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit ist. Zur Kalkulation der Ausfallwahrscheinlichkeit ist ein Parameter erforderlich: Die mittlere Ausfallhäufigkeit Lambda.

Mit Hilfe der Poissonverteilung wird jeweils der Erwartungswert für das Eintreten einer Anzahl von Bedarfen (x) errechnet. Dazu werden die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Einzelereignissen ($x=1$, $x=2$, $x=\dots$, $x=n$) berechnet.

Der Zeitparameter t wird nicht als Stunden und Minuten ausgeführt sondern als Volllaststunden betrachtet. Da im Winter eine höhere Anzahl von Volllaststunden zu erwarten ist ergibt sich für die Wintermonate eine höhere zu erwartende Ausfallmenge.

Lambda gibt die während einer bestimmten Zeitspanne zu erwartende Anzahl von Ereignissen an. Relevant für die Prognose ist die Anzahl der Bedarfe während der Wiederbeschaf-

fungszeit eines bestimmten Ersatzteils. In Lambda wird ferner die Anzahl der Windenergieanlagen und die durchschnittliche Lebensdauer des betrachteten Ersatzteils berücksichtigt. Daraus ergibt sich folgende Formel für die Berechnung des Erwartungswertes λ :

Die folgenden Größen beziehen sich immer auf das betrachtete Ersatzteil.

$$\lambda = \frac{N_V}{MTBR} \times LT \quad \text{Gl. 3.6}$$

MTBR Mean Time between Removal [Stunned]

LT Lieferzeit bzw. Wiederbeschaffungszeit [Tage]

NV Anzahl Volllaststunden pro Tag [Stück]

Berechnung der Anzahl zu erwartender Volllaststunden pro Tag:

$$N_V = n_A \cdot n_V \quad \text{Gl. 3.7}$$

n_V mittlere tägliche Anzahl Volllaststunden pro WEA

n_A Anzahl Windenergieanlagen

Berechnung der Einzelwahrscheinlichkeit für das Eintreten einer bestimmten Anzahl von Ausfällen im Betrachtungshorizont (ALT) mittels der Dichtefunktion der Poissonverteilung:

$$P_\lambda(x) = \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda} \quad \text{Gl. 3.8}$$

Durch Aufsummieren der Dichtefunktion ergibt sich die Verteilungsfunktion der Poissonverteilung. Der Servicelevel beschreibt die Anzahl der erfolgreich bedienten Nachfragen im Verhältnis zu der Gesamtanzahl der Nachfragen bei einer bestimmten Lagermenge (ULM). Wenn das Lager nicht leer ist, also $LM - 1$, ist die Verteilungsfunktion der Poissonverteilung gleich dem Servicelevel zu setzen.

$$SL = \sum_{x=0}^{x=LM-1} \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda} \quad \text{Gl. 3.9}$$

LM Lagermenge [Stück]

SL Servicelevel [Prozent]

Der Zusammenhang soll im Folgenden an einem Szenario erläutert werden, in dem ein bestimmter Lagerbestand für eine große Anzahl von Anlagen vorgegeben ist. Aus den Betriebsstunden und der MTBR berechnet sich der Servicelevel bei vorgegebener Lagerbestandsmenge unter der Voraussetzung des exponentiellen Ausfallverhaltens.

Szenario

Lagermenge (ULM) = 1 bis 30 Stück;

Wiederbeschaffungszeit (ALT) = 60 Tage;

Anzahl der Volllaststunden pro Anlage pro Tag (VOLLSTE) = 16 Stunden;

MTBR = $9 \cdot 365 \cdot 24$ Stunden; entspricht 9 Jahren Lebensdauer

Anzahl der Anlagen (n) = 1000;

Lagermenge	Servicelevel	Lagermenge	Servicelevel	Lagermenge	Servicelevel
1	0,0000	11	0,3290	21	0,9866
2	0,0001	12	0,4416	22	0,9929
3	0,0004	13	0,5558	23	0,9964
4	0,0020	14	0,6628	24	0,9982
5	0,0067	15	0,7558	25	0,9992
6	0,0182	16	0,8314	26	0,9996
7	0,0415	17	0,8888	27	0,9998
8	0,0821	18	0,9300	28	0,9999
9	0,1438	19	0,9579	29	1,0000
10	0,2273	20	0,9757	30	1,0000

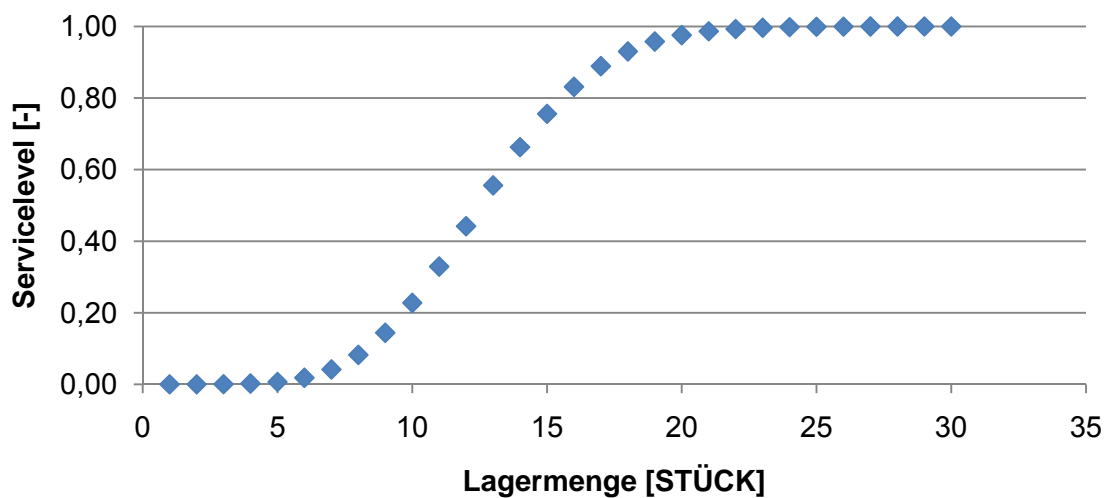


Bild 7: Servicelevel in Abhängigkeit der Lagermenge

In dem gegebenen Szenario ist zur Erreichung eines Zielservicelevels von 95 % eine Lagermenge von 19 Ersatzteilen erforderlich.

Mechanische Komponenten

Der Verschleiß- und Ausfallprozess mechanischer Komponenten wird mit Hilfe der Weibullverteilung beschrieben [ABR08]. Die zweiparametrische Weibullverteilung besitzt einen Form- und einen Skalenparameter, mit denen Früh-, Zufalls- als auch Verschleißausfälle beschrieben werden können. Die folgende Tabelle zeigt die Dichte- und die Verteilungsfunktion der Weibullverteilung.

	Dichtefunktion	Verteilungsfunktion
Weibullfunktion	$f(t) = \frac{\beta}{\lambda} \cdot \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta}$	$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta}$

β Formparameter der Weibullfunktion

λ Skalenparameter der Weibullfunktion

Der für die Exponentialfunktion beschriebene Erneuerungsprozess kann auch für die Weibullverteilung vollzogen werden. Damit sind die langfristig erwarteten Bedarfe kalkulierbar. Da die Erneuerungsfunktion für weibullverteiltes Ausfallverhalten nicht analytisch gelöst werden kann ist auf eine Näherungslösungen zurückzugreifen [STR12]. In der Literatur sind dafür beispielsweise die Ansätze von Ghodrati [GHO05] oder Beckmann [BEC78] enthalten. In Gleichung 3.10 ist der Ansatz nach Beckmann gezeigt.

$$H(t) \sim \begin{cases} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta & \text{für } 0 \leq t \leq t^* \\ \left(\frac{t^*}{\lambda}\right)^\beta + \frac{1}{\lambda} * (t - t^*) & \text{für } t \geq t^* \end{cases} \quad t^* = \lambda * (0,9 * \beta)^{\frac{1}{\beta-1}} \quad \text{Gl. 3.10}$$

$H(t)$ Erneuerungsfunktion

Die Berechnung der Anzahl von Erneuerungen soll anhand eines Beispiels veranschaulicht werden: Für eine Betrachtungseinheit mit den Parametern $\beta = 2$, $\lambda = 500\text{h}$ soll die Anzahl erwarteter Erneuerungen während des Planungszeitraumes von $t = 2000\text{h}$ berechnet werden. Aus der Gleichung 3.10 ergeben sich für $t^* = 900\text{h}$ und damit für $H(2000\text{h}) = 5,44$ Erneuerungen.

Laut Abernethy kann für die Weibullverteilung auch das Summieren der Ausfallwahrscheinlichkeiten zur Ermittlung der Bedarfe während einer bestimmten Periode verwendet werden [ABR08]. Die folgende Gleichung 3.11 zeigt die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeiten zum heutigen Zeitpunkt x und die Wahrscheinlichkeit zum Ende der Prognoseperiode $t+x$.

$$F_x(t) = \frac{F(t+x) - F(x)}{1 - F(x)} \quad \text{Gl. 3.11}$$

$F_x(t)$ Ausfallwahrscheinlichkeit am Ende der Planungsperiode unter der Voraussetzung, dass das Gerät bis x überlebt hat

Die mittlere zu erwartende Ausfallwahrscheinlichkeit pro Komponente ist nach Abernethy zu summieren (Gleichung 3.12). Hieraus ergibt sich die erwartete Bedarfsmenge im Prognosehorizont.

$$\overline{F_x}(t) = \sum_{i=1}^n F_x(t)_i \quad \text{Gl. 3.12}$$

n Anzahl der Komponenten

$\overline{F_x}(t)$ kumulierte Ausfallwahrscheinlichkeit während der Planungsperiode [-]

3.2.3 AP 230 Berechnung der WEA-Ausfallwahrscheinlichkeit

Ziel

Das Ziel des AP 230 ist das Zusammenführen der Erkenntnisse aus den Arbeitspaketen 210 und 220, um die Ausfallwahrscheinlichkeiten interdependenter Antriebsstrangkomponenten zu kombinieren. Dadurch kann das Risiko für den Ausfall einer WEA bewertet werden. Unter der Annahme, dass es sich bei dem System um eine monotone Struktur handelt, kann unter Einbezug der technischen Abhängigkeiten der Komponenten untereinander die Wahrscheinlichkeit für die Verfügbarkeit des gesamten Systems errechnet werden.

Durchgeführte Arbeiten

Zur Zielerreichung sind Datenaufnahmen bei den beteiligten Unternehmen und Datenanalysen durchgeführt worden. In den Daten aus Logbucheinträgen konnte beispielsweise ein Zusammenhang zwischen der Unterbaugruppe Generatorlager und Generator hergestellt werden. So führt das Lagerversagen und ein hieraus resultierender Folgeschaden zum Wechsel des gesamten Generators. Aufgrund der geringen Stichprobenanzahl ist es jedoch im Rahmen des Projekts unmöglich eine allgemeingültige quantitative Aussage zu den Auftretenswahrscheinlichkeiten von Interdependenzen unter den Antriebsstrangkomponenten zu treffen. Dennoch ist durch die Analysen das Auftreten derartiger Effekte bewiesen, sodass die Berücksichtigung derartiger Effekte gerechtfertigt ist. Eine Quantifizierung der Effekte ist von den jeweiligen Anwendern durchzuführen. Beispielhaft sind deshalb im Projekt die Quantifizierung der Auswirkungen einer bedingten Anlagenausfallwahrscheinlichkeit auf den Lagerbestand analysiert worden.

Erzielte Ergebnisse

Das ein Bedarf einen anderen Bedarf oder das ein Versagen einer Komponente den Stillstand der gesamten WEA hervorruft kann mit Hilfe bedingter Wahrscheinlichkeiten abgebil-

det werden. Wie in der Analyse in AP 120 dargelegt führt ein Getriebeschaden häufig auch zu einem Bedarf des Hauptlagers oder ein Lagerschaden zum Versagen des Generators. Unter der Voraussetzung, dass ein Getriebe defekt ist, kann daher auch mit einem Hauptlagerbedarf kalkuliert werden. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten ist von dem Instandhaltungsunternehmen festzulegen. Im Folgenden Rechenszenario wird von einer bedingten Wahrscheinlichkeit von 70 Prozent ausgegangen (d.h. ein Ausfall von einem Getriebe führt zu einer Wahrscheinlichkeit von 70 Prozent zu einem Lagerausfall $P(H|G)$). Unter der Berücksichtigung der Einzelwahrscheinlichkeit $P(G)$ kann die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls durch Multiplikation der bedingten und der Einzelwahrscheinlichkeit berechnet werden. Hinzu kommt die Wahrscheinlichkeit, die durch die komponentenspezifische Ausfallwahrscheinlichkeit determiniert ist. Sie muss zu der berechneten Einzelausfallwahrscheinlichkeit addiert werden.

	Wahrscheinlichkeit						
Einzel ausfallwahrscheinlichkeit für Hauptlager ($P(G)$)	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
Bedingte Wahrscheinlichkeit ($P(H G)$)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Einzel ausfallwahrscheinlichkeit für Getriebe $P(H)$	0,07	0,11	0,14	0,18	0,21	0,25	0,28

Der Verlauf der gesuchten bedingten Wahrscheinlichkeit des Ausfalls eines Hauptlagers unter der Voraussetzung, dass ein Getriebe versagt ist in Bild 8 gezeigt. Aus der Darstellung geht hervor, dass eine erhöhte Einzelwahrscheinlichkeit des Hauptlagerversagens dazu führt, dass auch die Ausfallwahrscheinlichkeit des Hauptlagers steigt. Dieser Kausalzusammenhang sollte in weiteren Arbeiten Beachtung finden.

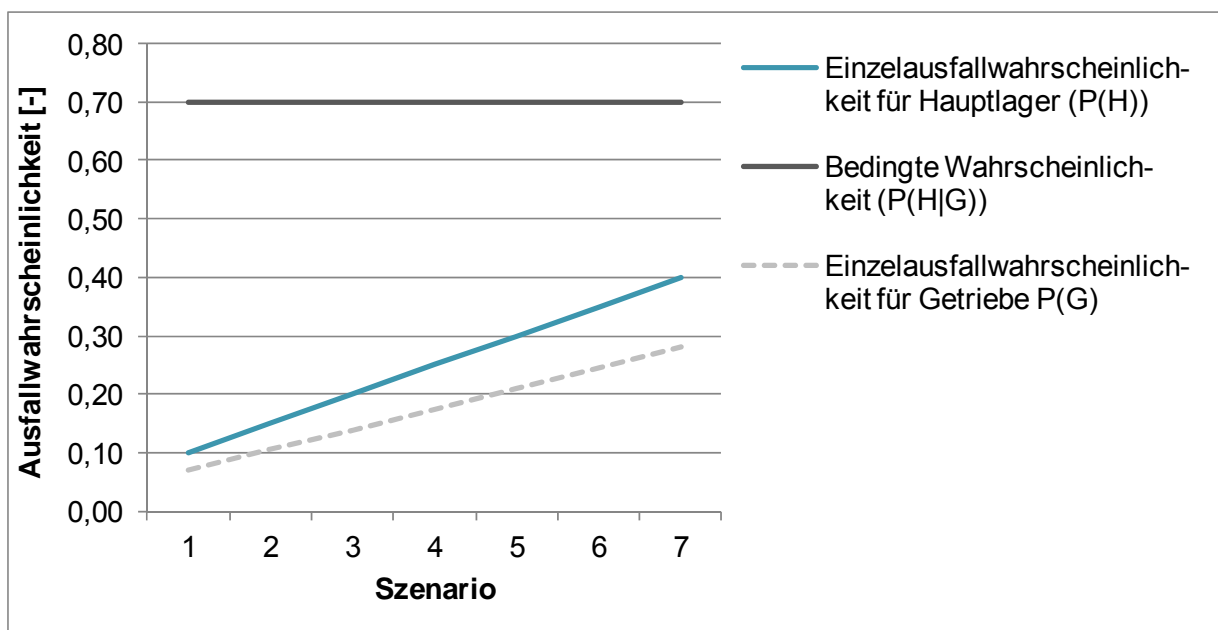


Bild 8: bedingte Wahrscheinlichkeiten des Ausfalls

3.3 AP 300 Analyse der Randbedingungen im Servicenetzwerk

3.3.1 AP 310 Erfassung der Engpassgrößen und -ressourcen

Ziele des AP 310 sind das Erfassen von Engpassgrößen und -ressourcen bei der Instandhaltung von Windenergieanlagen (WEA).

Durchgeführte Arbeiten

Zur Zielerreichung wurden Literaturrecherchen und Expertenbefragungen in Form von Telefoninterviews durchgeführt. Überdies fand die Auswertung von Wetterdaten statt.

Erzielte Ergebnisse

Zur Instandhaltung von On- und Offshore-WEA ist der Einsatz von Transportmitteln unabdingbar. In einem Standardszenario werden WEA-Besitzer, WEA-Betreiber und WEA-Instandhaltungsdienstleister unterschieden. Letztgenannter beauftragt, sofern für den Instandhaltungseinsatz erforderlich weitere Subunternehmer, wie Hubschrauber- und Schiffsunternehmen oder Zertifizierungsunternehmen [FRA10]. Neben diesen sind häufig Transportunternehmen und das Vorliegen passender Umgebungseinflüsse, wie passende Wetterverhältnisse notwendig. Insbesondere Reparaturmaßnahmen bei Rotorblättern erfordern bestimmte Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsgrenzwerte sowie das Einhalten definierter Windverhältnisse [TRA12].

Als Richtwert für die Windgeschwindigkeit, unter der im Onshore-Bereich noch Instandhaltungsarbeiten durchgeführt werden können, sind 8 m/s definiert [o.V.13b]. Zwischen 9 und 10 m/s darf die WEA Gondel noch betreten werden, sodass kleine Komponenten und visuelle Inspektionen noch möglich sind. Jedoch dürfen keine Großkomponenten, wie Getriebe, Hauptlager oder Rotorblätter bei diesen Windverhältnissen montiert werden. Bei Windgeschwindigkeiten über 10 m/s sind ausschließlich Wartungsarbeiten am Fundament durchführbar [o.V.13c], [o.V.13d]. Grundsätzlich gilt, dass die Beurteilung der Durchführbarkeit von Instandhaltungsarbeiten im Ermessen des Kranführers liegt [o.V.13b], [o.V.13d]. Oft erübrigt sich diese Beurteilung, da in Kränen fest eingebaute Windsensoren das Ausfahren des Kranes verhindern [o.V.13c]. Zu den Restriktionen durch zu hohe Windgeschwindigkeiten kommt eine Verhinderung des Instandhaltungseinsatzes aufgrund von der Unbefahrbarkeit der Zuwegungen der WEA. Insbesondere Schnee und Regen verhindern das Befahren mit Schwerlastkränen. So ist im Frühjahr und Herbst die Befahrbarkeit nur zu ca. 50 % gegeben. Im Winter können die Anlagen in etwa 25% aller Fälle nicht erreicht werden. Im Sommer besteht dagegen keine Einschränkung. Mit Hilfe von Baggermatten, die zusätzliche Kosten verursachen, ist es möglich die Anlage ganzjährig zu erreichen [o.V.13b].

Bei der Auswirkung der Umgebungseinflüsse ist hinsichtlich On- und Offshore- Einsatz zu differenzieren, da die Bedingungen im Offshore-Feld schneller und häufiger wechseln und damit zu längeren Verzögerungen führen können als im Bereich der Onshore-Instandhaltung. Die Expertenbefragung haben ergeben, dass der Austausch von Onshore-Großkomponenten selbst im Winter möglich ist. Dabei ist zu beachten, dass sich der Austauschzeitpunkt aufgrund der äußeren Einflussgrößen und der Nicht-Verfügbarkeit von Res-

sources häufig verschiebt. Diese Verschiebung wird monetär bewertet und bei der Instandhaltungsterminierung in Form von Ausfallkosten berücksichtigt. Mit dem Instandhaltungstermin verschiebt sich auch der Zeitpunkt zu dem das Ersatzteil das Lager verlässt, bzw. zu dem Minderbestandskosten berechnet werden müssen, sofern das Lager leer ist. Deshalb wird mit Hilfe der aufzustellenden Kostenfunktionen die Auswirkung der Maßnahmenverschiebung bewertet (AP400).

Die Erneuerung von Großkomponenten, wie Rotorblättern oder Getrieben erfordert den Einsatz von Kränen, die entsprechend der jeweiligen Nabenhöhe dimensioniert werden [o.V.13c]. Aus den Analysen im Projekt geht hervor, dass für Kräne bis 800t im Onshore-Bereich keine Engpässe in der Ressourcenverfügbarkeit erwartet sind. Dagegen ist bei für Kräne mit einer Traglast > 800t im Frühjahr, Sommer und Herbst 10 Tage Wartezeit und im Winter 15 Tage Wartezeit wahrscheinlich [o.V.13a], [o.V.13c]. Neben eigentlichen Wartezeiten für die Ressourcen kommen Verzögerungen für Genehmigungen, Anfahrt und Aufbau des Kranes hinzu. Dafür sind etwa zwei Wochen einzuplanen [o.V.13b]. Für segmentierte große Kräne kommen Inbetriebnahme und Montagezeiten hinzu, die jedoch nicht von den PA-Mitgliedern quantifiziert worden sind [o.V.13b], [o.V.13d]. Die durch Wartezeiten für Kräne bedingte Verzögerung wirkt sich direkt auf die Stillstandzeit der WEA aus und verursacht damit Ausfallkosten.

Für die durchzuführenden Instandhaltungsarbeiten sind qualifizierte Techniker erforderlich [KES12], [TRA12]. Durch die Befragungen im Projekt ist in der folgenden Tabelle die Anzahl von Mitarbeitern für einen Bauteile austausch quantifiziert worden. Neben Mitarbeiterengpässen, bedingt durch Krankheit in den Wintermonaten sind für die Sommermonate vermehrt fehlende Ressourcen durch Urlaubstage zu erwarten. Insgesamt sind deshalb über das Jahr hinweg etwa 5 bis 10 % der Mitarbeiter nicht verfügbar [o.V.13b]. Sofern die Mitarbeiteranzahl nicht hinreichend ist, um die Arbeiten durchzuführen, ist mit verlängerten Reparaturzeiten zu kalkulieren.

Tabelle 2: Mitarbeiteranzahl zur Erneuerung von Bauteilen [o.V.13a]

Bauteil	Generator	Getriebe	Pitch	Rotorblatt	Umrichter
Anzahl Mitarbeiter	4	6	3	5	2

Wie im Stand des Wissens dargelegt ist der Einfluss der Wetterverhältnisse erheblich. Analysen zu Auswirkungen auf den Lagerbestand und die zugehörige Quantifizierung werden im Arbeitspaket 400 durchgeführt

3.3.2 AP 320 Bestimmung der Instandhaltungsfähigkeit

Ziele des AP 320 sind das Ableiten der durchschnittlichen Zugänglichkeit der Anlagen im Jahresverlauf. Dieses Teilziel wird wegen der in AP 310 erlangten Kenntnisse insofern adaptiert, als dass die Instandhaltungsmaßnahmen länger in der Durchführung dauern, da die Zugänglichkeit zu jeder Jahreszeit gegeben ist, jedoch mit Verzögerungen in der Durchführung der Maßnahmen zu rechnen ist.

Durchgeführte Arbeiten

Zur Integration der verlängerten Stillstandzeit wurden Kostenfunktionen definiert, die zunächst in Excel und der Statistiksoftware R (R) und anschließend in einem Skript der Programmiersprache Python abgebildet wurden. Letztgenanntes mündet zum Projektende in einem Planungswerkzeug, das plattformunabhängig zur Bestandsplanung eingesetzt werden kann. Die Auswertungen und Analysen in Excel und R dienen der Validierung der Kostenfunktionen.

Erzielte Ergebnisse

Die Integration der Engpassgrößen erfolgt als monetäre Bewertungsgröße. Bei der Verfügbarkeit aller Ressourcen und Vorliegen passender Wetterbedingungen entspricht die Stillstandzeit der Anlage der Reparaturzeit. Anderenfalls ist die Stillstandzeit um die Wartezeit bis zum Eintritt passender Wetterbedingungen oder verfügbarer Ressourcen verlängert (Bild 2).

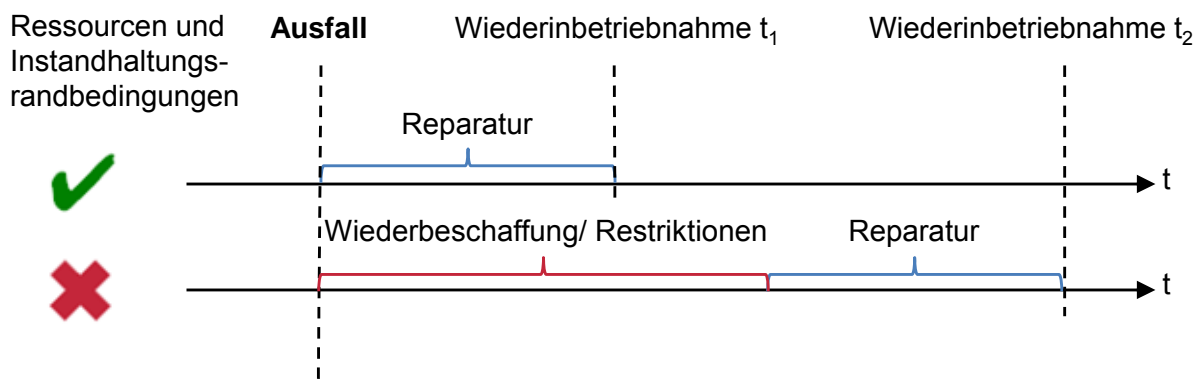


Bild 2. Auswirkung auf die Stillstandzeit der Primäranlage

Die folgende Gleichung 3.13 präsentiert die zur Ersatzteilplanung angewandte Kostenfunktion zur Berechnung des kostenminimalen Lagerbestandes [THO05]. Zur Berechnung der minimalen täglichen Gesamtkosten c_t werden für die erwartete Bedarfshöhe m_b und für den Lagerbestand S systematisch Parameterkombinationen untersucht. Dabei ergibt sich die Auftretenswahrscheinlichkeit mittels der Ausfallfunktionen, die aus den historischen Bedarfsdaten parametrisiert ist. Die Ausfall- und Bestandskosten k_A und k_i sind in AP 410 definiert.

$$c_t = \left(\sum_{m_b=S}^{\infty} (m_b - S) p_m \right) k_A + \left(\sum_{m_b=0}^S (S - m_b) p_m \right) k_i \quad \text{Gl. 3.13}$$

c_t	tägliche Gesamtkosten [€]
m_b	Bedarfshöhe während der Wiederbeschaffungszeit [Stück]
S	Bestandshöhe [Stück]
p_m	Auftretenswahrscheinlichkeit [-]

k_A	Ausfallkosten pro Tag [€]
k_i	Bestandskosten pro Tag [€]

3.4 AP 400 Definition einer Methode zur Lagerbestandsplanung von Ersatzteilen

3.4.1 AP 410 Quantifizierung von Minderbeständen

Ziel des AP 410 ist die Quantifizierung monetärer Folgen von Minderbeständen und Überbeständen, um einen kostenoptimalen Lagerbestand für ein zentrales Ersatzteillager abzuleiten.

Durchgeführte Arbeiten

Der probabilistische Prognoseansatz aus AP200 wurde mit den Ausfallkosten, resultierend aus den Restriktionen bei der Instandhaltung (AP300) gemeinsam in Excel und R programmiert. Parameteranalysen stellen dabei die Validität sicher.

Erzielte Ergebnisse

Ertragsausfallkosten werden im Bereich der Windenergieerzeugung entweder anhand von Vergangenheitsdaten oder durch die Betrachtung benachbarter, noch funktionsfähiger WEA ermittelt. Die Gleichung 3.14 zeigt die von der Stillstandzeit der WEA abhängige Kostenstruktur. Der Parameter e gibt den Ertrag pro Kilowattstunde wieder und ist durch die von der Bundesregierung festgelegte Einspeisevergütung determiniert [Nn12]. Für den Betrieb von Offshore-WEA gilt während der ersten 12 Betriebsjahre eine Vergütung von 15 Ct/ kWh. Im Onshore-Umfeld werden dagegen 5,8 Ct/ kWh erzielt [Nn12]. Die Dauer des Stillstandes t_{mtr} richtet sich nach der Art der Erneuerung und den aktuell vorliegenden Zugänglichkeitsrestriktionen. Hinzu kommen Instandhaltungsaufwendungen K_{Ins} , die ausschließlich durch nicht verfügbare Ersatzteile bedingt sind. Dazu zählen

$$K_A = t_{mtr} \cdot e \cdot l_j + K_{Ins} \quad \text{Gl. 3.14}$$

K_A	Ausfallkosten einer Windenergieanlage [€]
t_{mtr}	Dauer des Stillstandes [Tage]
e	Ertrag pro Kilowattstunde [€/ kWh]
l_j	Mittlere Leistung der WEA [kW]
K_{Ins}	Instandhaltungsaufwendungen [€]

Im Gegensatz zu Unterbeständen wirken sich Überbestände aufgrund der Kapitalbindungskosten negativ auf die Wirtschaftlichkeit der Instandhaltung aus.

Zu den Lagerhaltungskosten gehören alle mit der physischen Lagerhaltung in Verbindung stehenden Aufwendungen, wie Lagerraum-, Lagermaterial-, Lagerpersonal-, und Lagergemeinkosten. Die Gleichung 3.15 zeigt alle Bestandteile der beeinflussenden Kosten. Die Ka-

pitalbindungskosten sind innerhalb der Lagermaterialkosten enthalten. Sie sind bestimmt durch Abschreibungen für die im Lager befindlichen Güter und Steuern. Dagegen sind Lagerraumkosten unabhängig von der gelagerten Menge, sofern mit einer Bestandserhöhung keine Vergrößerung des Lagers einhergeht. Die Lagerpersonalkosten enthalten Lohn- und Verwaltungskosten für Lager- und Verwaltungsmitarbeiter. Weitere, den Ersatzteilen nicht direkt zurechenbare Kosten, sind in den Lagergemeinkosten enthalten. [KLA09]

$$K_L = K_{LM} + K_{LR} + K_{LP} + K_{LG} \quad \text{Gl. 3.15}$$

K_L	Lagerhaltungskosten [€]
K_{LM}	Lagermaterialkosten [€]
K_{LR}	Lagerraumkosten [€]
K_{LP}	Lagerpersonalkosten [€]
K_{LG}	Lagergemeinkosten [€]

Eine Annäherung der Kostenbestandteile erfolgt in der Praxis für die nicht direkt zurechenbaren Kostenbestandteil Lagerpersonal-, Lagerraum-, und Lagergemeinkosten mittels eines kalkulatorischen Lagerhaltungskostensatzes [HAR97]. Die Vereinfachte Berechnung der Lagerhaltungskosten, bezogen auf Ersatzteil ist in der Gleichung 3.16 dargestellt. Laut Literatur wird der kalkulatorische Lagerhaltungskostensatz z_L mit 15 – 25 % des Beschaffungspreises eines Ersatzteils K_{ETi} pro Jahr angenommen.

$$K_{Li} = K_{ETi} \cdot ((z_E + z_L) + 1)^{t_{Li}} \quad \text{Gl. 3.16}$$

K_{Li}	Lagerhaltungskosten pro Ersatzteil [€]
K_{ETi}	Beschaffungskosten eines Ersatzteils i [€]
z_L	Kalkulatorischer Lagerhaltungskostensatz [Prozent]
z_E	Kapitalbindungssatz [Prozent]
t_{Li}	Dauer der Lagerhaltung des Ersatzteils i [Tage]

Die mit Hilfe der Gleichung 3.16 berechneten täglichen Lagerhaltungskosten gehen als Bestandskosten k_i in die Gleichung 3.12 ein.

AP 420 Ausfallkosten in Abhängigkeit des Ausfallzeitpunktes

Ziel des AP 420

In AP 420 wird die Ausfallkostenfunktion unter Berücksichtigung des Ausfallzeitpunktes aus den Ergebnissen des AP 320 und AP 410 erzeugt. Der Ausfall eines kritischen Teils am An-

fang einer langen Periode ohne Instandhaltungsfähigkeit der WEA verursacht höhere Ausfallfolgekosten als der Ausfall eines Teils in Zeitintervallen mit hoher Instandhaltungsfähigkeit, in welchen die Reparatur ohne Verzögerung durchgeführt werden kann.

Durchgeführte Arbeiten

Zur Beurteilung der ausfallzeitpunktabhängigen Kosten erfolgte im Projekt eine Auswertung der Windgeschwindigkeiten in der Nordsee. Hohe Windgeschwindigkeiten führen zu Wellenhöhen, die eine Reparatur und Instandhaltung von WEA unmöglich machen. Andererseits begünstigen hohe Windgeschwindigkeiten die Ertragsstruktur, sodass die während der Stillstandzeit zu erwartenden Ertragsausfälle steigen. Sobald die Instandhaltung von WEA möglich ist wird von einem „weather day“ gesprochen [EVW08]. Eine Umrechnung zwischen Windgeschwindigkeiten und erwarteter Wellenhöhe findet mit Hilfe der Daten von [WLS12] statt. Dabei wird zwischen Tiefsee und Flachsee, wie sie in der Nord- und Ostsee vorliegt, differenziert. Laut der Definition nach [WLS12] und [EVW08] wird bei ca. 5 Beaufort (Bft.) (8,0 – 10,8 m/s Windgeschwindigkeit) eine Wellenhöhe von 1,5 Metern erreicht, sodass keine Instandhaltung mehr möglich ist. Im Projekt sind öffentlich zugängliche Daten von Wetterstationen ausgewertet worden. Dazu fanden die Daten der Wetterstationen Helgoland, Leuchtturm Alte Weser, List auf Sylt und Norderney Einsatz. Die mittlere Windgeschwindigkeit dieser vier Messstellen ist während der Jahre 2002 bis 2010 im Bild 9 gezeigt.

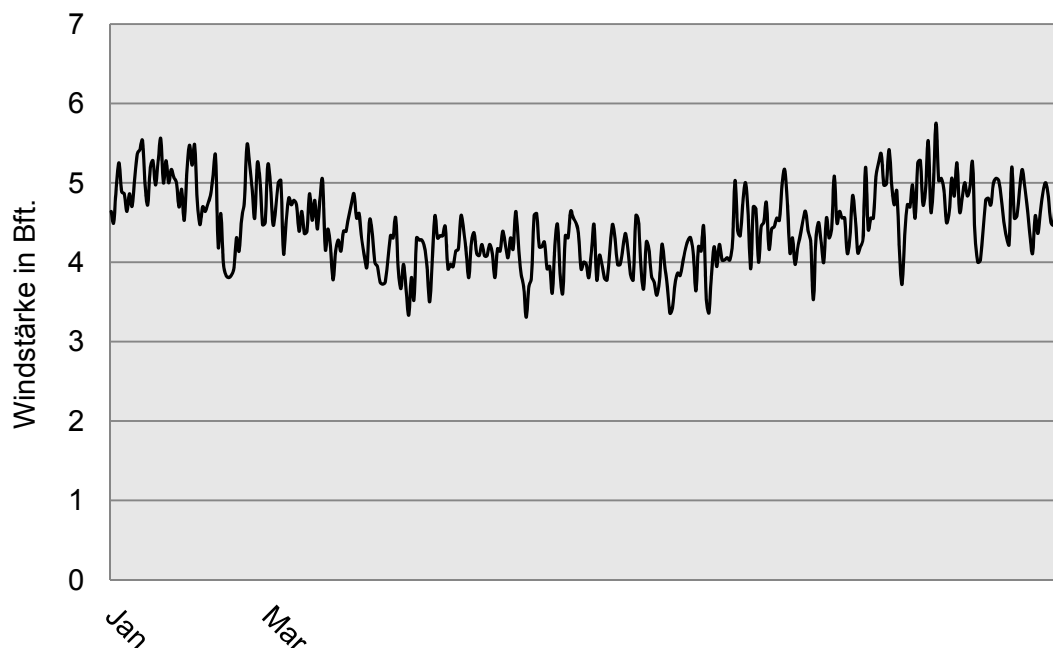


Bild 9: Mittlere Windgeschwindigkeit pro Tag (Jahre 2002 – 2010)

Aus dem Bild geht hervor, dass während der Sommermonate die mittlere Windgeschwindigkeit überwiegend geringer als 5 Bft. ist. In den Wintermonaten Oktober bis einschließlich März überschreitet die mittlere Windgeschwindigkeit dagegen in ca. 50% aller Vorkommnisse die 5 Bft. Grenze. Während dieser Zeit sind die Anlagen nicht erreichbar. Diese Nicht-Erreichbarkeit ist in Form von verlängerten Stillstandzeiten in die Ausfallkostenfunktion des AP 410 eingearbeitet.

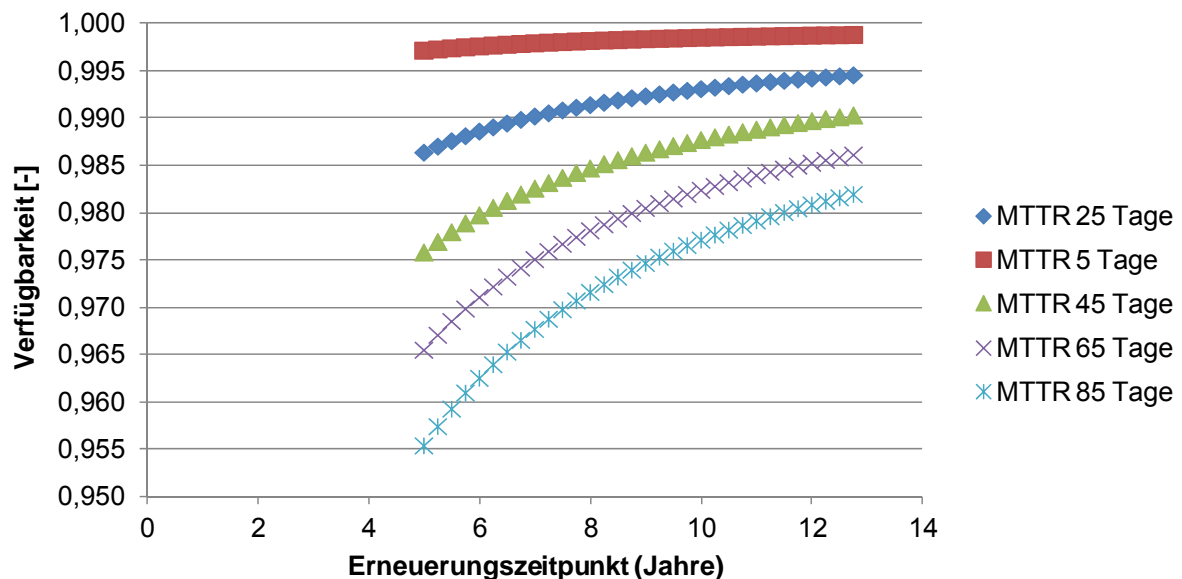
Aus der Kostenfunktion des AP 410 geht hervor, dass die entgangenen Erträge die Ausfallkosten beeinflussen. Die entgangenen Erträge sind durch die Stillstanddauer und die in Bild 7 gezeigten Windgeschwindigkeiten beeinflusst. Zur Beurteilung des Einflusses sind daher Parameteranalysen durchgeführt worden, in denen die Verfügbarkeit einer WEA in Abhängigkeit der mittleren Reparaturdauer (MTTR) und des Alters einer Komponente berechnet worden ist. Dabei sind die folgenden Parameter untersucht worden:

Parameter	Variationsbreite
Lebensdauer	5 – 12,75 Jahre
Reparaturdauer	5 – 85 Tage

Weitere Analysen sind gemeinsam mit den Lagerhaltungskosten im AP 430 dokumentiert, da hiermit die Auswirkung von zu übermäßig gelagerten und fehlenden Ersatzteilen beurteilt werden kann.

Ergebnisse

Aus den Parameteruntersuchungen der Verfügbarkeit ergibt sich folgende Darstellung:



Aus dem Diagramm geht hervor, dass mit verlängerter Reparaturdauer die Verfügbarkeit der Anlage sinkt. Dieser Kausalzusammenhang ist für die WEA-Instandhaltungsentscheidungsfindung insofern von Relevanz, als das in vielen Zeitperioden des Jahres mit einer signifikant verlängerten Reparaturdauer zu rechnen ist. Je länger die Reparaturdauer ist, umso geringer ist die Verfügbarkeit der Anlage. Die Auswirkung der verlängerten Reparaturdauer wird umso schwächer, je größer die Lebensdauer der Komponente ist. Bei der Überlegung, ob die Komponente vor einem Zeitfenster der Nicht-Verfügbarkeit getauscht werden soll, ist die Verfügbarkeit zum jetzigen Alter, z.B. 5 Jahre, mit der zu erwartenden

MTTR mit der Verfügbarkeit der Anlage zu dem wahrscheinlich erwarteten Ausfallzeitpunkt im Zeitfenster der Nicht-Zugänglichkeit zu vergleichen. Da die Reparaturzeit im Fall der Nicht-Zugänglichkeit länger ist, wird die Verfügbarkeit der Anlage sinken. An einem Beispiel im Diagramm wird der Zusammenhang deutlich: Zum heutigen Zeitpunkt beträgt das Alter der betrachteten Komponente 5 Jahre. Eine Erneuerung kann mit minimaler Reparaturzeit von fünf Tagen erfolgen. Betrachtet auf die gesamte erreichte Lebensdauer berechnet sich die Verfügbarkeit der Anlage damit zu 0,9973. Sofern die Komponente nicht getauscht wird und diese in der Folge während der nächsten Nicht-Verfügbarkeitsperiode ausfällt, ist die Lebensdauer der Komponente zwar verlängert, gleichzeitig verlängert sich jedoch auch die Reparaturdauer auf beispielsweise 25 Tage. Die zu erwartende Verfügbarkeit beträgt dann 0,987. Bei der ausschließlichen Betrachtung der Verfügbarkeit wäre daher eine Reparatur vorzuziehen. Bei der Erweiterung der Betrachtungen um die entstehenden Kosten wird der Effekt noch verstärkt, da während der Nicht-Verfügbarkeitsperiode auch höhere Windgeschwindigkeiten und damit gesteigerte Erträge erwartet sind. Die Integration der beiden Aspekte erfolgt im AP 430.

3.4.2 AP 430 Bestandsplanung unter Berücksichtigung der Instandhaltungsfähigkeit

Ziel des AP 430

Durch die Gegenüberstellung von Lagerhaltungskosten sowie Ausfallfolgekosten kombiniert mit der Ausfallwahrscheinlichkeit und der Instandhaltungsfähigkeit in AP 430, kann der kostenoptimale Lagerbestand bestimmt werden. Dieser wird dynamisch im Jahresverlauf angepasst.

Durchgeführte Arbeiten

Basierend auf den in AP 310, AP 410 und AP 420 durchgeführten Analysen und Untersuchungen ist in diesem Arbeitspaket die Untersuchung der Ausfallwahrscheinlichkeit während des Planungshorizontes vollzogen worden. Der Planungshorizont entspricht dabei entweder der Wiederbeschaffungszeit oder der Nicht-Zugänglichkeitsdauer der WEA, weil im Fall eines Minderbestandes im schlimmsten Fall genau für diese Zeitdauer mit einem Anlagenausfall zu rechnen ist. Zur transparenten Analyse der Zusammenhänge wird ein Parameter eingeführt, der Ausfall- und Lagerhaltungskosten während des Untersuchungszeitraumes gegenüberstellt. Mit diesem werden die Teilaspekte

- verhinderte Zugänglichkeit,
- dynamische, im Jahresverlauf schwankende Erträge,
- erwartete Lagerhaltungsdauer,
- Länge des Planungshorizontes und
- Kosten des Ersatzteils in die Bestandsplanung einbezogen werden.

Ergebnisse

Die stark schwankenden Umgebungseinflüsse resultieren in einer veränderten Kosten- und Ertragsstruktur, die wiederum den kostenoptimalen Bestand beeinflusst [SCH14]. Bei einer

erwarteten Ausfallwahrscheinlichkeit während des Prognosehorizontes von $p = 0,2$ und 20 zu versorgenden Anlagen, resultiert für tägliche Stillstandkosten i.H.v. 800 € und täglichen Lagerkosten pro Ersatzteil i.H.v. 400 € der in Bild 3 gezeigte Lagerbestand. Die Ausfallwahrscheinlichkeit ergibt sich dabei aus dem Ausfallverhalten der betrachteten Einheit und dessen aktuellen Alters. Für die Analysen ist angenommen, dass der Ausfall des Ersatzteils zu Beginn der Planungsperiode stattfindet.

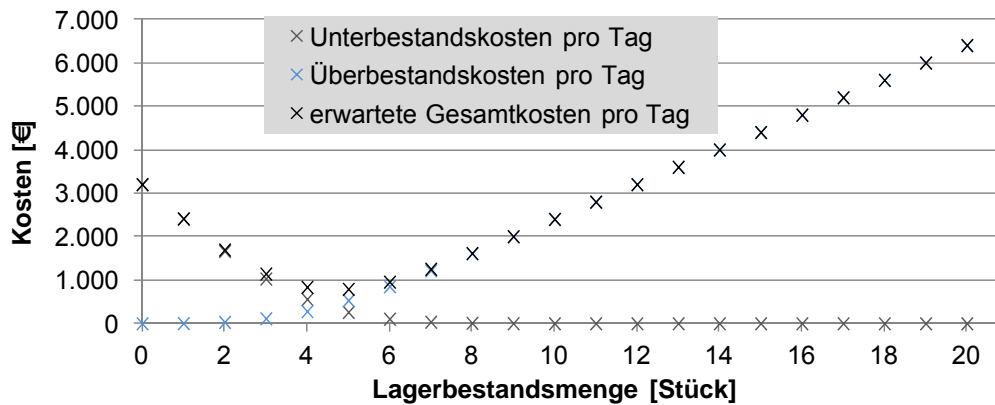


Bild 3. Kosten in Abhängigkeit des Lagerbestands (20 Anlagen, $p=0,2$)

Wie in AP 320 festgestellt, schwankt das Verhältnis aus Bestands- und Stillstandkosten im Jahresverlauf erheblich. Deshalb wird der kostenminimale Ersatzteilbestand in Abhängigkeit des Kostenverhältnisses aus Unter- und Überbestandskosten beurteilt (Gleichung 3.17) [SCH14]. In die Gleichung 3.14 gehen die mit Hilfe der Gleichungen 3.15 und 3.17 berechneten Über- und Unterbestandskosten, bezogen auf einen Tag ein.

$$v = \frac{k_L}{k_A} \quad \text{Gl. 3.17}$$

v Kostenverhältnis [-]

k_L Lagerhaltungskosten pro Tag pro Ersatzteil [€/Tag]

k_A Stillstandkosten pro Tag pro WEA [€/Tag]

So ist der Einfluss fehlender oder unnötig gelagerter Ersatzteile direkt sichtbar. Dies bietet die Grundlage für die dynamische Anpassung der Bestände im Jahresverlauf. Beispielhaft ist im Bild 4 der kostenminimale Bestand für drei verschiedene Kostenverhältnisse gezeigt.

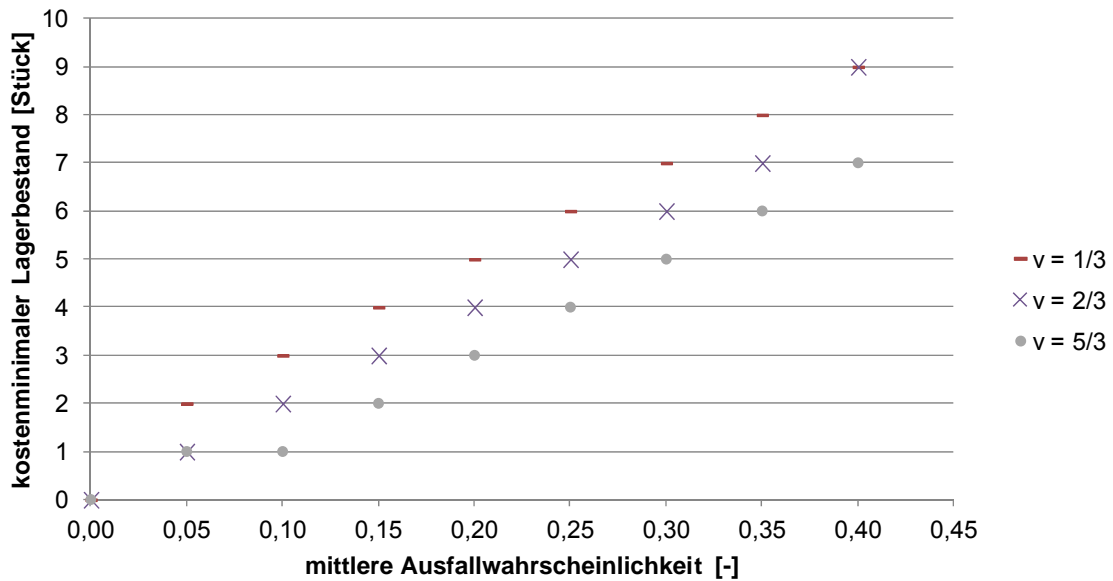


Bild 4. Kostenminimaler Bestand bei variablem Kostenverhältnis

Je geringer die Stillstandkosten im Vergleich zu den Lagerhaltungskosten sind, umso niedriger ist der kostenminimale Bestand. Diese Situation tritt beispielsweise im Sommer ein. Das Bild zeigt auch den Trendverlauf bei steigender Ausfallwahrscheinlichkeit. Je höher die Ausfallwahrscheinlichkeit, umso höher ist der resultierende kostenminimale Bestand, da die steigende Ausfallwahrscheinlichkeit Stillstandkosten begünstigt.

3.5 AP 500 Ergebnistransfer und Dokumentation

3.5.1 AP 510 Dokumentation der Ergebnisse

Während des gesamten Projektes erfolgte die Dokumentation der durchgeführten Forschungsarbeiten und in Form von Präsentationen und Veröffentlichungen. Details zu den durchgeführten Maßnahmen sind im Kapitel 4 enthalten. Überdies sind die Kernergebnisse im vorliegenden Forschungsbericht enthalten.

3.5.2 AP 520 Veröffentlichung und Messe

Die Ergebnisse sind während des Projektes durch Konferenzbeiträge und Zeitschriftenartikel publiziert worden. Nach dem Projektende werden die Erkenntnisse im Rahmen eines Buchbeitrages der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Der Ergebnistransfer in den PA sowie Vorträge, Messeteilnahmen und der regelmäßige Austausch bei Netzwerktreffen der Windenergie- und Ersatzteillogistikbranche tragen ferner zur Verbreitung der Ergebnisse bei. Die in Kapitel 4 erläuterten Maßnahmen sind wie geplant ergriffen worden.

4 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die im Rahmen des Forschungsprojektes erarbeiteten Ergebnisse werden während der Laufzeit und im Anschluss an die Forschungsarbeit verbreitet. Die angestrebten Maßnahmen sind tabellarisch dargelegt und entsprechend den Maßnahmen gruppiert.

4.1 Maßnahmen während des Projektes

	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Maßnahme A: Verbreitung der Ergebnisse durch Homepagepräsenz.	Erreichung von KMU, die nicht aus der WEA-Branche stammen.	A1 Ausgewählte Ergebnisse werden auf den Internetseiten des Institutes veröffentlicht	laufend durchgeführt
Maßnahme B: Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Ein breites Fachpublikum der Windenergiebranche wird durch Posterpräsentationen und Fachvorträge erreicht.	B1 Posterpräsentation auf der weltgrößten Windenergiemesse "Husum Wind 2012"	Sep. 2012 durchgeführt
		B2 Fachvortrag auf dem Arbeitsgruppentreffen der WAB („Ersatzteillogistik Luftfahrt und Windenergie“)	Aug. 2013 durchgeführt
		B3 Fachvortrag bei der jährlichen CIRP-Sitzung	Jan.2014 durchgeführt
		B4 Fachvortrag auf der Logistikkonferenz ISSL	Juli 2014 durchgeführt
Maßnahme C: Einbeziehung von Multiplikatoren	Mitarbeiter der Forschungsstelle sind aktive Mitglieder bei der Windagentur Bremerhaven (wab). Regelmäßige Treffen ermöglichen Erfahrungsaustausch	C1 wab Mitgliedertreffen mit mehr als 200 Teilnehmern	Jun. 2012 Sept. 2012 durchgeführt März 2013 durchgeführt
Maßnahme D: Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung	Vermittlung der Planungsmethode an Studierende	D1 Lehrtätigkeit an der Uni-Bremen im Fach Montagelogistik	WiSe12/13 durchgeführt
		D2 Betreuung von Projekt- und Abschlussarbeiten an der Universität Bremen	WiSe12/13 SoSe 13 durchgeführt
Maßnahme E: Projektbegleitender Ausschuss	Die Forschungsergebnisse sollen fortlaufend im PA ausführlich diskutiert werden.	E1 Vorstellung des Projektes und Diskussion des Arbeitsplans E2 Vorstellung der ersten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens E3 Abschlusspräsentation und Diskussion aller erzielten Ergebnisse	II Quartal 2012 durchgeführt II Quartal 2013 durchgeführt II Quartal 2014 <i>geplant</i>

Maßnahme G: Veröffentlichung		E4	bilaterale Diskussionen mit einzelnen Mitgliedern des PA	laufend durchgeführt
	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	G1	Beitrag im Konferenzband des BVL Logistik-Kongress	Okt. 2012 durchgeführt
		G2	Beitrag im Jahresbericht von FORWIND	Jan. 2013 durchgeführt
		G3	Beitrag im Konferenzband Procedia CIRP Vol.7 „Conference on Manufacturing Systems 2013“	Mai 2013 durchgeführt
		G4	Beitrag in Fachzeitschrift (Logistik Heute)	Sept. 2013 durchgeführt

4.2 Maßnahmen nach Abschluss des Projektes

	Ziel	Rahmen	Datum/ Zeitraum
Maßnahme G: Veröffentlichung	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	G5 Buchbeitrag „Through-life Engineering Services: Motivation, Theory, and Practice“	I Quartal 2015 Artikel angenommen
Maßnahme H: Transfer in die Wirtschaft durch Verband	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	H1 Zusammenfassende Darstellung im Forschungsreport	Aug. 2014 geplant
Maßnahme I: Newsletter	Eine schnelle Verbreitung der Ergebnisse wird durch Newsletter sichergestellt.	I1 Nach Projektende werden Ergebnisse im Newsletter der BVL veröffentlicht	Jul. 2014 geplant
Maßnahme J: Beratung der Industrie basierend auf erzielten Forschungsergebnissen	Unterstützung von KMU durch maßgeschneiderten Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis	J1 Bei Bedarf weiterer Transfer der Ergebnisse in die betriebliche Praxis	laufend

4.3 Veröffentlichte Arbeiten während des Vorhabens

Während des Forschungsvorhabens wurden nationale und internationale Beiträge in Fachzeitschriften, auf Fachdatenbanken und Konferenzen veröffentlicht. Alle während des Projektes publizierten Beiträge sind nachfolgend aufgelistet:

Tracht, K.; Westerholt, J.; Schuh, P.: Spare Parts Planning for Offshore Wind Turbines subject to Restrictive Maintenance Conditions. 46th International Conference on Manufacturing Systems (CMS2013), eds.: P.F. Cunha, K. Ueda, J. Vancza, J.C. Caldeira Portugal (2013) 563 - 568 <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.033>.

Tracht, K.; Schuh, P.: *Rechnen statt nur horten. Logistik Heute, Jahrgang 35, Heft 9 (2013) 26 – 27.*

Tracht, K.; Goch, G.; Schuh, P.; Westerkamp, J.F.; Sorg, M.: *Failure Probability Prediction based on Condition Monitoring Data of Wind Energy Systems for Spare Parts Supply. In. CIRP - Annals Manufacturing Technology, Vol. 62, Issue 1 (2013) 127–130.*

Tracht, K.; Schneider, D.; Schuh, P.: *Ersatzteilversorgung hochwertiger Industriegüter. Schriftenreihe Wirtschaft & Logistik - Tagungsband. 29. Logistik-Kongress und EUROLOG (2013) 159 – 184.*

Die nach dem Projekt veröffentlichten Arbeiten umfassen:

Schuh, P.; Funke, L.; Tracht, K.: *Cost optimal spare parts planning for wind energy systems 7th International Scientific Symposium on Logistics, 4. - 5. Juni (2014) Köln.*

Geplant sind die folgenden beiden Veröffentlichungen:

Schuh, P.; Perl, C.; Tracht, K.: *Integration of Operational Data into Maintenance Planning. In: Through-life Engineering Services: Motivation, Theory, and Practice. Hrsg.: Louis Redding und Rajkumar Roy (2015).*

Schuh, P.: *Ausfallprognose in der Instandhaltung zustandsüberwachter Maschinen und Anlagen. Dissertationsschrift, Universität Bremen (2015).*

5 Einschätzung der Realisierbarkeit

Die durchgeführten Forschungsarbeiten zeigen, dass bereits mit etablierten Methoden eine Vielzahl der Fragestellungen in der Ersatzteilplanung von WEA-Komponenten beantwortet werden kann. Zu diesem Zweck ist deshalb ein Planungs- und Prognosewerkzeug entwickelt worden, das den Einsatz, direkt nach dem Projektende erlaubt. Es ist in der Lage auf der Basis vergangener Bedarfe in eine Prognose mit einem servicelevelbasierten Lagerbestand zu berechnen. Sofern von dem Anwender der kostenminimalen Servicelevel, basierend auf den Umgebungsbedingungen vorgegeben wird, handelt es sich bei dem vorgeschlagenen Bestand auch um einen kostenminimalen Bestand. Die Voraussetzungen zur Berechnung des kostenminimalen Bestandes sind in diesem Projekt dargelegt worden. Die Realisierbarkeit der direkten Berechnung kostenminimaler Bestände ist mit geringem Aufwand umzusetzen. Die größte Herausforderung wird sich bei der Quantifizierung der Kosten und der Datenpflege seitens der Betreiber und Dienstleister ergeben. Für die in den geplanten Veröffentlichungen vorgeschlagene Berücksichtigung von Zustands- und Betriebsdaten bei der Ersatzteilplanung sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich. Der erwartete Zeithorizont für die auf Zustands- und Betriebsdaten basierende Ersatzteilplanung beträgt 2 Jahre.

6 Verwendung der Zuwendung

Die Verwendung der Zuwendungen ist nachfolgend tabellarisch nach Arbeitspaketen gruppiert präsentiert.

Arbeitspaket	Personenmonate (wissenschaftlich-technisches Personal A.1)	Geräte/ Leistungen Dritter
100	5	-
200	4	-
300	4	-
400	9	-
500	2	-
SUMME	24	-

7 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit war zur Zielerreichung des Forschungsprojektes notwendig. Die Komplexität der Themenstellung rechtfertigt den Einsatz eines durchgängig beschäftigten Wissenschaftlichen Mitarbeiters während der gesamten Projektlaufzeit von 24 Monaten. Die Studentische Hilfskraft hat den Wissenschaftlichen Mitarbeiter bei der Aufbereitung der Ergebnisse sowie den vorbereitenden Recherchen unterstützt.

8 Planungstool – EloPlan – Bedienungsanleitung

Während des Forschungsprojektes wurden die Fragestellungen sowohl aus wissenschaftlicher Perspektive fundiert analysiert und herausgearbeitet als auch ein Planungswerkzeug entwickelt, das praxisnah und unmittelbar nach Projektende eingesetzt werden kann. Damit sind der wirtschaftliche Betrieb von WEA und die Ersatzteilplanung in KMU direkt unterstützt. In dem Planungswerkzeug sind nicht alle im Rahmen des Projektes erforschten Methoden implementiert, da die durchgeführten Analysen zeigen, dass die Datengrundlage für eine automatisierte Verarbeitung und Nutzbarmachung zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung nicht gegeben sind. Deshalb gründet ein Großteil der zum Test und zur Validierung der Methoden durchgeführten Datenanalysen auf Experteninterviews und manuellen Datenbereinigungs- und –aufbereitungsprozessen. Für die vollständige Implementierung der erforschten Methoden sind deshalb zunächst eine ausreichende Datengrundlage als auch die Definition von Schnittstellen zu den in den KMU eingesetzten Softwarelösungen zu schaffen.

Nachfolgend ist die Funktionsweise und die Bedienungsanleitung des im Rahmen dieses Forschungsprojektes entwickelten Prognose- und Planungstools EloPlan dargelegt.

8.1 Installation

Für die Anwendung des Tools „EloWind Prognosen“ sind neben einer Standardinstallation von Python weitere ergänzende Module notwendig. Es sind noch nicht alle für das Tool notwendigen Pakete in der aktuellen Pythonversion 3.4.x verfügbar, so dass zunächst eine Installation von Python 3.3.x empfohlen wird, unter der das Tool geschrieben worden ist. Das gewünschte Installationsprogramm für die Standardinstallation von Python steht auf der Projekthomepage [DEI08] von Python zum Download bereit.

8.1.1 Benötigte Pakete

Die GUI („graphical user interface“) wird mit dem Paket „tkinter“ erzeugt, welches in der Standardinstallation von Python enthalten ist. Ebenfalls enthalten ist ein SQLite Paket namens „sqlite3“, mit dem Zwischenergebnisse in einer temporären Datenbank abgelegt werden. Obwohl in der Standardbibliothek bereits einige mathematische Funktionen enthalten sind, werden diese über das Paket „numpy“ ergänzt, wodurch unter Anderem die Kreiszahl π zugänglich wird.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt über das Modul „pyplot“ des Pakets „matplotlib“ und wird mittels tkinter in der GUI eingebettet. Inoffizielle Installationsprogramme für Windows 32 und 64 bit verschiedener Pythonversionen, können von Christoph Gohlke (University of California) [GHO14] bezogen werden. Auch wenn diese inoffiziell sind, konnten bislang keine Probleme in der Funktionalität von Python beobachtet werden, so dass der Vorteil einer vereinfachten Installationsprozedur überwiegt.

Das Schreiben in Excel-Arbeitsmappen wird mit dem Paket „xlsxwriter“ ermöglicht und ist derzeit ausschließlich bis Python 3.3.x verfügbar. Stehen wie bei dem xlsxwriter unter [GHO14] keine Installationsprogramme zur Verfügung, lohnt sich die Einrichtung von setup-tools, welches wie alle zuvor benannten Pakete über den „Python Package Index“ [PAR14] bezogen werden kann.

Weitere Einstellungen finden auf Systemebene von Windows statt, für die das Modul „pywin32“ benötigt wird, welches über sourceforge bezogen werden [MHA12] kann.

8.2 Funktionen

Das Tool stellt zwei grundlegende Funktionen zur Verfügung: Die Berechnung von Bedarfsprognosen sowie die des Verlaufs des Lagerlevels auf Basis dieser Prognosen. Die GUI ist in drei grundlegende Abschnitte gegliedert (vgl. Bild 10):

1. Bedarfsprognose
2. Lagerbestandsplanung
3. Ergebnisvisualisierung

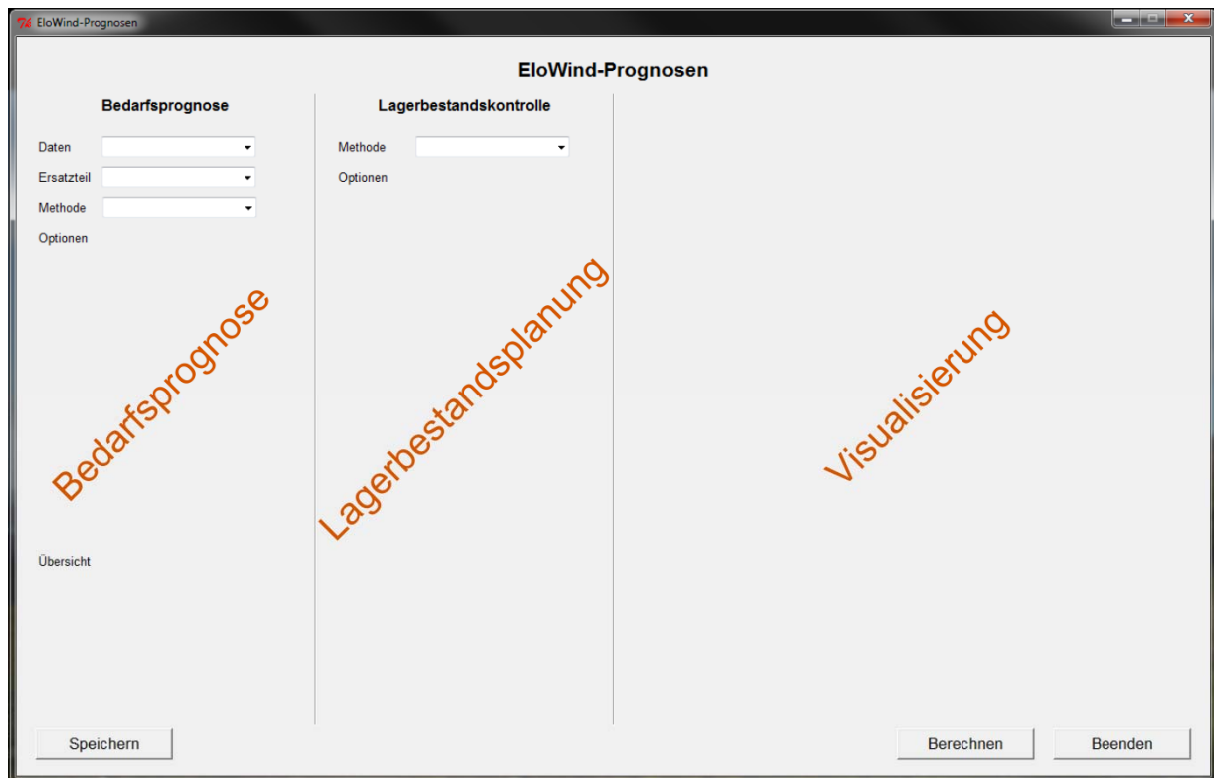


Bild 10: Abschnitte der GUI

8.2.1 Bedarfsprognose

In dem Bereich der Prognose existieren insgesamt drei Comboboxen, mit denen die historischen Daten bereitgestellt und die Berechnungsmethode ausgewählt werden. Die oberen Beiden betreffen die Auswahl der Daten. Das Einlesen der Daten wird derzeit ausschließlich für das csv-Dateiformat unterstützt und wird über die Combobox „Daten“ aufgerufen. Die Auswahl begrenzt sich derzeit auf das Einlesen von Daten, in späteren Programmversionen wird eine manuelle Eingabe von Daten folgen (vgl. Bild 11)

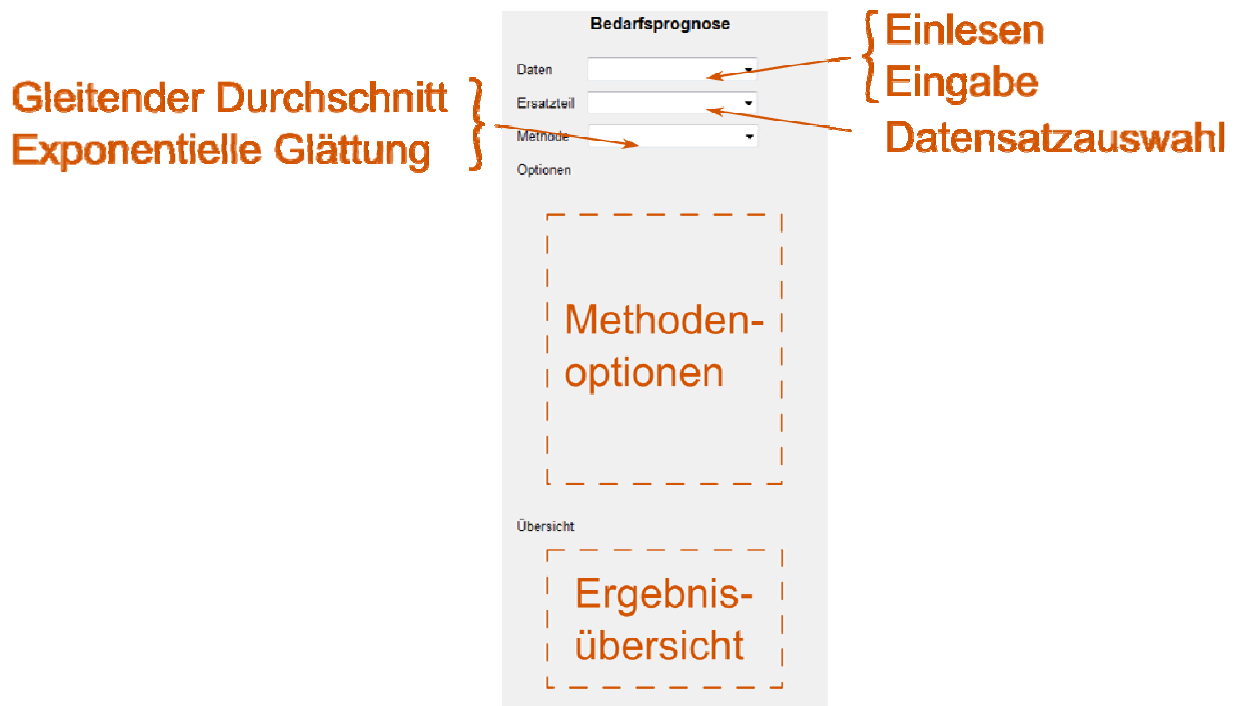


Bild 11: Übersicht des Prognoseabschnitts

In der zweiten Combobox werden die verfügbaren Datensätze ausgewählt. Details der Dateneingabe werden in Abschnitt 0 dargestellt. Jeder Eintrag in der Liste entspricht dabei den Bedarfszahlen eines Bauteils.

Die dritte und letzte Combobox dieses Abschnitts ermöglicht die Auswahl des gewünschten Prognoseverfahrens. Derzeit stehen die folgenden Methoden zur Verfügung:

- Exponentielle Glättung („Exp. Glättung“)
- Gleitender Durchschnitt (Gl. Durchschnitt)

Die beiden grundlegenden Methoden werden in zwei beziehungsweise drei weitere Methoden unterteilt:

Exponentielle Glättung

- Einfache exponentielle Glättung (SES)
- Doppelte exponentielle Glättung (DES)
- Dreifache exponentielle Glättung (TES)

Gleitender Durchschnitt

- Einfach gewichtet gleitender Durchschnitt (SMA)
- Gewichteter gleitender Durchschnitt (WMA)

Nach Auswahl einer der beiden grundlegenden Berechnungsmethoden erscheinen im Abschnitt „Optionen“ weitere GUI-Elemente, mit der die Auswahl der Methode weiter eingegrenzt und die für die Berechnungsmethode notwendigen Parameter eingegeben werden können.

Bild 12: Optionen der exponentiellen Glättung und des gleitenden Durchschnitts

In den folgenden Unterabschnitten wird auf die Grundlagen der jeweiligen Berechnungsmethode eingegangen. Details zu den Verfahren können unter anderem [THO10] oder [AXS06] entnommen werden.

Einfach gewichtet gleitender Durchschnitt

Der SMA ist geeignet für Daten, die tendenziell mit fortschreitender Zeit um ein konstantes Niveau schwanken. Bei diesem Verfahren wird ein Durchschnitt der Bedarfszahlen y_t der vorangegangenen T Zeitperioden als Prognose für den nächsten Zeitabschnitt \hat{y}_{t+1} angenommen:

$$\hat{y}_{t+1} = \frac{1}{T} \sum_{\tau=t-T+1}^t y_{\tau} \quad 8.1$$

Die Ordnung des Verfahrens wird gegeben durch die Anzahl der vorangegangenen Zeitperioden, über die der partielle Mittelwert gebildet wird. Ist in der GUI eine Ordnung von drei angegeben, wird der Mittelwert der vorangegangenen drei Zeitperioden als Prognose für die nächste Periode verwendet.

Gewichtet gleitender Durchschnitt

Der gewichtet gleitender Durchschnitt berechnet sich analog zu dem SMA mit dem Unterschied, dass die vorangegangenen Zeitperioden gewichtet in den Durchschnitt eingehen:

$$\hat{y}_{t+1} = \frac{1}{\sum_{i=1}^T a_i} \sum_{\tau=t-T+1}^t a_{\tau} \cdot y_{\tau} \quad 8.2$$

Mit den jeweiligen Gewichten a . Die Gewichte der jeweils vorangegangenen Zeitperiode werden mit einem Leerzeichen voneinander getrennt in der GUI eingegeben.

Bild 13: Eingabebeispiel der Gewichte bei WMA

Hierbei wird das erste eingegebene Gewicht, dem zeitlich betrachtet jüngsten Bedarfswert, das Zweite dem zwei Zeitperioden zuvor und so weiter zugeordnet. Die Ordnung des gewichtet gleitenden Durchschnitts ergibt sich aus der Anzahl gegebener Gewichte und ist nur Programmiertechnisch von Bedeutung.

Einfache exponentielle Glättung

Wie die gleitenden Durchschnitte ist die einfache exponentielle Glättung (SES) für tendenziell auf gleichem Niveau verbleibende Bedarfswerte geeignet. Der grundlegende Unterschied zwischen den gleitenden Durchschnitten und den exponentiellen Glättungen besteht darin, dass bei der SES sämtliche historische Daten berücksichtigt werden. Je weiter die Daten in der Historie zurückliegen, desto weniger stark werden sie in der Prognose berücksichtigt. In ihrer einfachsten Formulierung berechnet sich die Prognose zu:

$$\hat{y}_{t,t+1} = \alpha y_t + (1 - \alpha) \hat{y}_{t-1,t} \quad 8.3$$

Mit dem Glättungsparameter α , dem aktuellen Bedarf y_t , und der vorangegangenen Bedarfsprognose $\hat{y}_{t-1,t}$. Der Glättungsparameter hat hierbei einen Wertebereich von null bis eins.

Doppelte exponentielle Glättung

Die doppelte exponentielle Glättung (DES) ist geeignet für Bedarfe, die tendenziell einen linearen Verlauf beschreiben. Es werden der Achsenabschnitt a_t sowie der Gradient b_t mit den Glättungsparametern α beziehungsweise β gelättet. Der Ablauf der Routine ist wie folgt:

1. Berechnung eines Initialwertes für Achsenabschnitt und Gradient

$$b_{init} = \frac{y_t - y_1}{t - 1} \quad 8.4$$

$$a_{init} = y_t \quad 8.5$$

In der GUI wird die Initialwertbildung durch den Parameter t_{start} beeinflusst. Dieser bestimmt über wie viele Zeitperioden die Initialwerte berechnet werden. Allgemein beschreibt dieser Parameter den Start der Prognoseprozedur, so dass die erste Bedarfsprognose in $t_{start} + 1$ zu finden ist.

2. Beginnend mit der Initialisierung werden in jeder Zeitperiode t der Achsenabschnitt und der Gradient geschätzt und mit diesen der Bedarf prognostiziert:

$$\hat{y}_{t,t+1} = a_t + b_t \quad 8.6$$

$$a_t = \alpha y_t + (1 - \alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}) \quad 8.7$$

$$b_t = \beta(a_t - a_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad 8.8$$

Dreifache exponentielle Glättung

Die dreifache exponentielle Glättung (TES) ist für Daten mit saisonalen Schwankungen geeignet. Im Vergleich zur doppelten exponentiellen Glättung wird ein saisonaler Faktor c_t mit dem Glättungsparameter γ eingeführt. In der Literatur ist die Methode unter dem Namen „Holt-Winters-Verfahren“ zu finden, deren Ablauf in vier Schritte eingeteilt ist:

1. Schätzen von Gradient b und Achsenabschnitt a über Mittelwerte der ersten und letzten Saison.
2. Bereinigung der Nachfrage um den Trend in den jeweiligen Perioden der zur Initialisierung ausgewählten Saisons
3. Berechnung der Saisonalen Faktoren (Schätzung aus Initialisierung)
4. Prognose

Es ergibt sich nach den allgemeinen Regeln zur Berechnung von Mittelwerten für Saison 1 und Saison n :

$$\mu_1 = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P y_p \quad 8.9$$

$$\mu_n = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P y_{P(n-1)+p} \quad 8.10$$

Wobei P der Anzahl an Zeitperioden pro Saison entspricht. Die Initialwerte von Achsenabschnitt und Gradient ergeben sich aus den Mittelwerten:

$$b_{init} = \frac{(\mu_N - \mu_1)}{((N - 1)P)} \quad 8.11$$

$$a_{init} = \mu_1 - b_{init} \frac{P + 1}{2} \quad 8.12$$

Der erste Parametersatz für Gradient und Achsenabschnitt in der jeweiligen Periode ergeben sich zu:

$$a_{n \cdot P} = a_{init} + n \cdot P \cdot b_{init} \quad 8.13$$

$$b_{n \cdot P} = b_{init} \quad 8.14$$

Nach der Berechnung der ersten Werte für Achsenabschnitt und Gradient erfolgt die Bereinigung der initialisierenden Nachfrageschätzung um den Trend:

$$\tilde{y}_t = \frac{y_t}{a_{init} + b_{init} \cdot t} \quad 8.15$$

Mit $t = 1, 2, \dots, n \cdot P$. Die Saisonalen Faktoren c_t ergeben sich aus der Initialisierung und werden normalisiert, so dass die Summe aller c_t aller Perioden den Wert eins annimmt.

$$\bar{c}_t = \frac{(\tilde{y}_t + \tilde{y}_{t+P} + \dots + \tilde{y}_{t+P(N-1)})}{N} \quad 8.16$$

$$c_t = \frac{\bar{c}_t}{\frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \bar{c}_p} \quad 8.17$$

Mit $t = 1, 2, \dots, P$.

Die Aktualisierung des Achsenabschnitts, des Gradienten und des Saisonalen Faktors werden nach den Gleichungen (8.18) bis (8.20) durchgeführt:

$$a_t = \alpha \frac{y_t}{c_{t-P}} + (1 - \alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}) \quad 8.18$$

$$b_t = \beta(a_t - a_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1} \quad 8.19$$

$$c_t = \gamma \frac{y_t}{a_t} + (1 - \gamma)c_{t-P} \quad 8.20$$

Die Prognose des Bedarfs für die auf t folgende Periode ergibt sich nach:

$$\hat{y}_{t,t+\tau} = (a_t + b_t \tau) c_{t+\tau-P} \quad 8.21$$

Vom Anwender sind über die GUI die Eingabe Saisonanzahl („n(per)“) sowie die Glättungsparameter α , β und γ erforderlich. Geeignete Werte für α befinden sich in einem Bereich von 0,1 bis 0,3, für β in 0,1 bis 0,4 und γ in 0,2 bis 0,6 [THO10].

Prognosefehler

Alle Methoden haben als gemeinsame Option α MAD. Hierbei handelt es sich um eine einfache exponentielle Glättung der mittleren, absoluten Abweichung (Mean Absolute Deviation). Die Berechnung erfolgt analog zu der Vorschrift in Abschnitt 0:

$$MAD_t = (1 - \alpha)MAD_{t-1} + \alpha|x_t - \hat{x}_{t-1,t}| \quad 8.22$$

Hierbei wird ein normalverteilter Prognosefehler angenommen, der mit zunehmender Zeit nur geringen Schwankungen unterliegt.

Dateneingabe

Die Eingabe historischer Daten erfolgt derzeit ausschließlich über eine CSV-Datei in Tabellenform. In der ersten Spalte steht in fortlaufender Nummerierung die Zeitperiode, gefolgt von mehreren Spalten, die jeweils die Bedarfszahlen von Ersatzteilen enthalten und im weiteren Verlauf als Datensatz bezeichnet werden.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	t	Ersatzteil 1	Ersatzteil 2	Ersatzteil 3				
2	1	134,5	26,8	379,1				
3	2	106,8	39,2	472,8				
4	3	129,2	72,3	428,4				
5	4	153	71,3	607,7				
6	5	149,1	83,2	413,8				
7	6	158,3	92,2	512,8				
8	7	132,9	121,9	443,1				
9	8	149,8	112,1	634,7				
10	9	140,3	115,8	422,8				
11	10	138,3	154,2	500,1				
12	11	152,2	175,2	433,3				
13	12	128,1		666,2				
14	13			459,8				
15	14			523				
16	15			508				
17	16			696,8				
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								

Bild 14: Beispielaufbau einer Datendatei im CSV-Format

Die Spalte mit der Zeit als Inhalt hat genauso viele Zeilen, wie der längste in der Datei enthaltene Datensatz. Ob es sich bei der Zeiteinheit um Tage, Wochen, Monate oder Jahre

handelt, wird in den Berechnungen nicht berücksichtigt, so dass es dem Anwender obliegt, eine einheitliche Zeiteinheit in der Datenvorbereitung zu wählen.

Die erste Zeile der Eingabedatei entspricht dem Tabellenkopf, der in Puncto Datensatzauswahl in der GUI von entscheidender Bedeutung ist. Um etwaige Komplikationen zu vermeiden, sollte generell auf den Einsatz von Sonderzeichen verzichtet werden. Eine beispielsweise Eingabedatei ist in Bild 13 dargestellt.

8.2.2 Lagerbestandsplanung

In der Lagerbestandsplanung wird die Methode zur Berechnung der kostenoptimalen Bestellmenge mit der Berechnung des Auslöse und des Bestellbestandes zur Verfügung gestellt. Die Methode ermöglicht die Berechnung der Lagerbestandsentwicklung unter Annahme eines normalverteilten Bedarfs [AXS06]. Für Details sei auf die Ausführungen des zuvor benannten Werks verwiesen.

Die Losgröße Q wird unter der Anwendung der Andlerschen Losgrößenformel berechnet und basiert auf einer Kostenminimierung, die die fixen Bestellkosten A sowie die Lagerhaltungskosten h berücksichtigt:

$$Q = \sqrt{\frac{2A\mu}{h}} \quad 8.23$$

Mit der durchschnittlichen Nachfrage pro Zeiteinheit μ . Beschreibt der Nachfrageverlauf ein nahezu konstantes Niveau, entspricht μ der aktuellen Bedarfsprognose, sofern für eine Zeitperiode im Voraus prognostiziert wird (vgl. [AXS06]).

Beschreibt der Nachfrageverlauf hingegen einen linearen Trend, ist dieser zu berücksichtigen, so dass sich für eine geeignete Schätzung des Durchschnittswerts ergibt [AXS06]:

$$\tau(d) = -\left(\frac{a_t}{b_t} + \frac{1}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{a_t}{b_t} + \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2d}{b_t}} \quad 8.24$$

$$\mu = a_t + \left(\frac{1}{2} + \tau\right) b_t \quad 8.25$$

$$\tau' = \tau\left(R + \frac{1}{2}Q'\right) = -\left(\frac{a_t}{b_t} + \frac{1}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{a_t}{b_t} + \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2R + Q'}{b_t}} \quad 8.26$$

Mit dem optimalen Bestellpunkt R , dem geschätzten Achsenabschnitt a_t und Gradienten b_t . Bei saisonalen Nachfrageverläufen wird in einer Näherung der saisonale Faktor vernachlässigt, so dass weiterhin der mittlere Bedarf nach den Gleichungen (8.24) bis (8.26) ermittelt werden kann.

Für die Ermittlung des optimalen Bestellpunkts ist es notwendig, die Verteilung der Nachfrage während der Lieferzeit zu bestimmen. Mittelwert μ' und Standardabweichung σ' ergeben

sich hierbei aus dem Durchschnittsbedarf pro Zeitperiode μ beziehungsweise aus dem mit SES geglätteten Fehler MAD_t :

$$\mu' = \mu \cdot LT \quad 8.27$$

$$\sigma' = \sqrt{\frac{LT \cdot \pi}{2}} MAD_t \quad 8.28$$

Wobei Gleichung (8.28) unter Annahme voneinander unabhängiger Fehler gültig ist. Unter Vorgabe eines gewünschten Servicelevels SL ist es abschließend möglich mit Gleichung (8.29) den optimalen Bestellpunkt mittels Binärsuche zu bestimmen:

$$SL = 1 - \frac{\sigma'}{Q} \left[G\left(\frac{R - \mu'}{\sigma'}\right) - G\left(\frac{R + Q - \mu'}{\sigma'}\right) \right] \quad 8.29$$

In der Praxis sei es gängig, die s,S-Politik über die Losgröße Q und den Bestellpunkt R zu bestimmen, wobei ein genaues Erreichen des Bestellpunkts vorausgesetzt wird [AXS06]:

$$s = R \quad 8.30$$

$$S = Q + s \quad 8.31$$

Mit dem Wiederbeschaffungspunkt s und der maximalen Bestellmenge S .

Unter der Vorgabe der fixen Bestellkosten, der Lagerhaltungskosten, dem Lagerstartbestand, der Lieferzeit und des gewünschten Servicelevels wird auf Basis der beschriebenen Prozedur die zeitliche Entwicklung des Lagerbestands der Q,R-Politik berechnet. Zugänglich ist die Methode unter der Auswahl von „Norm.bed. SL“ im Abschnitt der Lagerbestandskontrolle (vgl. Bild 15). Hierbei ist zu beachten, dass die Lieferzeit als ganzzahliges Vielfaches der Zeiteinheit angegeben wird.

Lagerbestandskontrolle

Methode

Optionen

Kosten

Bestellung, fix

Lager

Weitere Optionen

Lagerstartbest.

Lieferzeit

Servicelevel

Bild 15: Eingabebeispiel normalverteilter Nachfrage unter Vorgabe eines Servicelevels

8.2.3 Korrekturfunktion

Die in den jeweiligen Rechnungsmethoden vom Benutzer fest zu legenden Parameter durchlaufen eine Prüfroutine, die sämtliche, nicht numerischen Charaktere entfernt und gegebenenfalls überzählige Vor- und Dezimalzeichen auf ein Exemplar reduziert. Die korrigierte Benutzereingabe wird in das Feld eingetragen, aus dem es ausgelesen worden ist. Der Anwender behält somit stets die Übersicht, mit welchen Parametern die aktuelle Berechnung durchgeführt worden ist. Dennoch gilt Obacht bei der Eingabe der Rechnungsparameter, denn es handelt sich ausschließlich um eine Methode zum entfernen nicht geeigneter Charaktere.

Methode

Optionen

Einfach Ordnung

Gewichtet Gewichte

Prognosefehler

α MAD

Korrektur
 →

Methode

Optionen

Einfach Ordnung

Gewichtet Gewichte

Prognosefehler

α MAD

Bild 16: Beispiel einer Korrektur

Bild 16 stellt das Beispiel einer fehlerhaften Benutzereingabe dar. Hierbei wird die Eingabe der Gewichte bei WMA von ursprünglich „--4- f3df 2 1“ auf „-4 3 2 1“ korrigiert.

8.3 Ergebnisausgabe

Sind bis zu diesem Punkt keine Fehler in der Anwendung des Programms aufgetreten, können über betätigen des Buttons „Berechnen“ die Bedarfs- und Lagerentwicklung auf Basis der ausgewählten Daten berechnet werden. Nach Abschluss erscheint eine Zusammenfas-

sung der Ergebnisse im unteren Prognosebereich sowie eine Visualisierung von Bedarfs- und Lagerbestandsverlauf mit zunehmendem Zeitintervall.

Die Zusammenfassung im Prognosebereich enthält den Namen der eingelesenen Datei, die Fehlermaße MAPE und MADt sowie den Prognosewert (siehe Bild 17). Bei den beiden Letzgenannten handelt es sich jeweils um die zeitlich jüngsten Prognosewerte.

Bedarfsprognose

Daten

Ersatzteil

Methode

Optionen

Einfach Ordnung

Gewichtet Gewichte

Prognosefehler

 α MAD

Übersicht

 Datei: Beispieldatensatz.csv

 Genauigkeit:

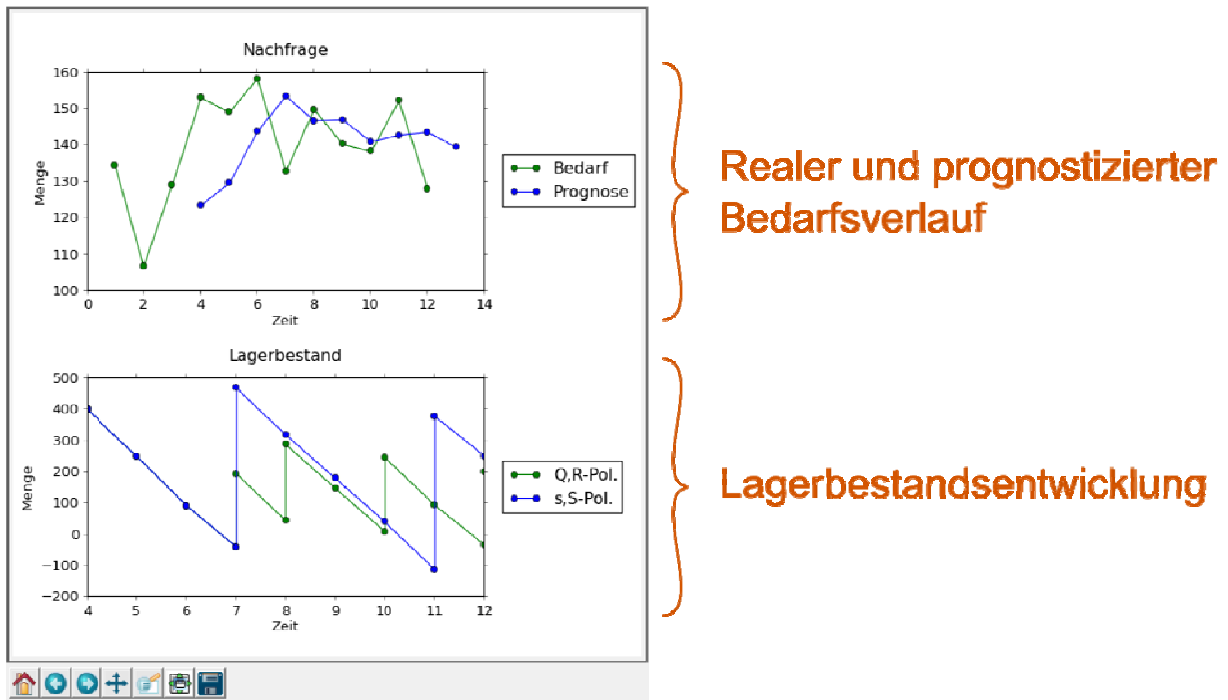
 MAPE = 0.09

 MADt = 18.92

 Prognose: $\hat{y} = 139.533333$

Bild 17: Ergebnisübersicht des Beispieldatensatz bei SMA dritter Ordnung

Die Visualisierung ist unterteilt in eine Darstellung des Bedarfsverlaufs sowie die Entwicklung des Lagerbestands nach der Q,R- und der s,S-Politik. Hierbei werden der reale und der prognostizierte Bedarfsverlauf in dem oberen, die Bestandsentwicklungen nach den benannten Bestellstrategien in dem unteren Diagramm vergleichend dargestellt (vgl. Bild 18).



Menüleiste

Bild 18: Diagramme zu prognostiziertem und realem Bedarfsverlauf sowie der Lagerbestandsentwicklung

Unter den Diagrammen befindet sich eine Menüleiste, mit der unter Anderem die Bereiche der Graphen vergrößert, verschoben oder die gesamte Abbildung gespeichert werden kann. Eine Benennung der Funktion des jeweiligen Eintrags in der Menüleiste erfolgt sobald der Mauszeiger sich über den entsprechenden Button bewegt. Eine detaillierte Beschreibung der Menüleiste sowie eine Einführung in das generieren von Diagrammen mittels Pyplot ist in einem Tutorial auf der Projekthomepage in der Rubrik „docs“ zugänglich, so dass weitere Ausführungen an dieser Stelle entfallen [HUN02].

Sämtliche Rechenergebnisse werden nach ihrer Berechnung in einer SQL Datenbank abgelegt, die mit Pythons Standardbibliothek „sqlite3“ generiert und verwaltet wird. Die Datenbank namens „temp.sqlite“ befindet sich in dem Programmverzeichnis und wird mit jedem Programmstart initialisiert, bleibt jedoch nach Beendigung des Programms erhalten. Hierdurch wird eine nachträgliche Bearbeitung (z.B. durch das Firefox-Addon „SQLite Manager“) oder das Erstellen einer Sicherungskopie ermöglicht.

Ein Speichern der durchgeführten Berechnungen in eine Excel Arbeitsmappe wird über den Speicher-Button in der unteren linken Ecke der GUI ermöglicht.

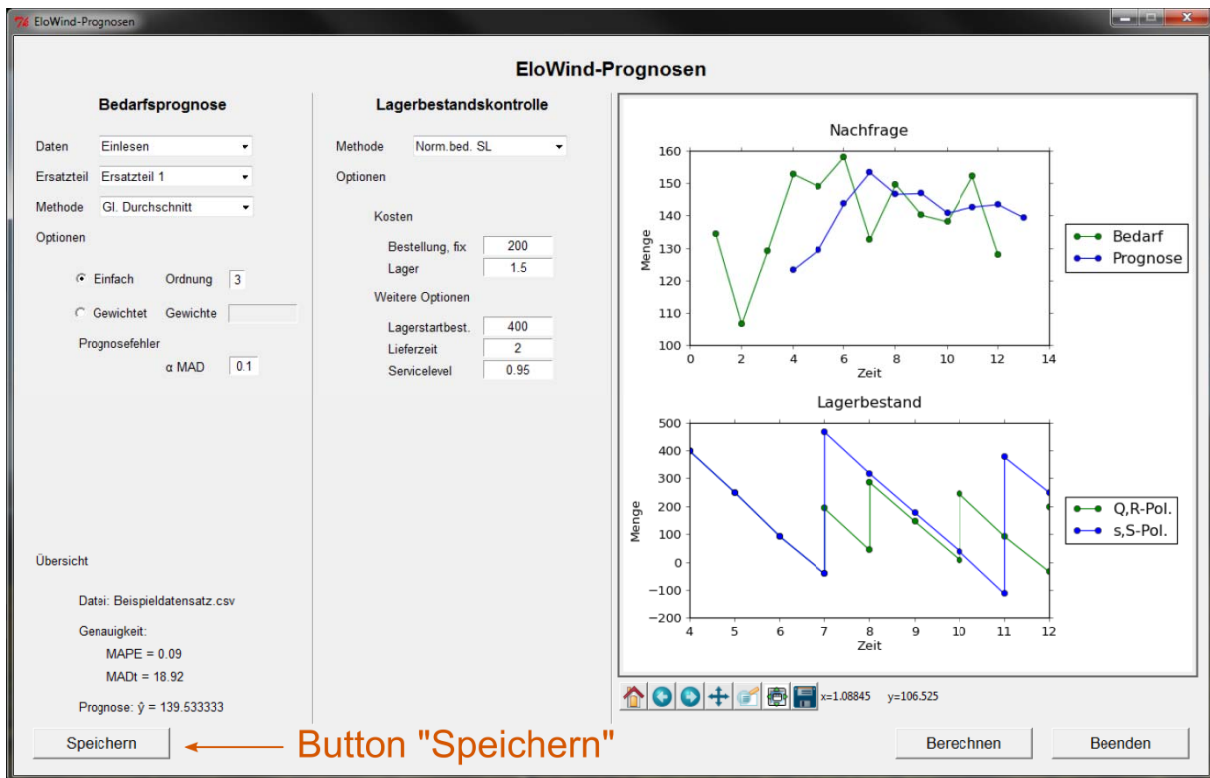


Bild 19: Lage des Speicherbuttons auf der Haupt-GUI

Nach der Betätigung dieses Buttons wird ein Übersichtsfenster generiert, welches alle getätigten Berechnungen sowie deren verwendeten Parameter zusammenfasst (siehe Bild 20).

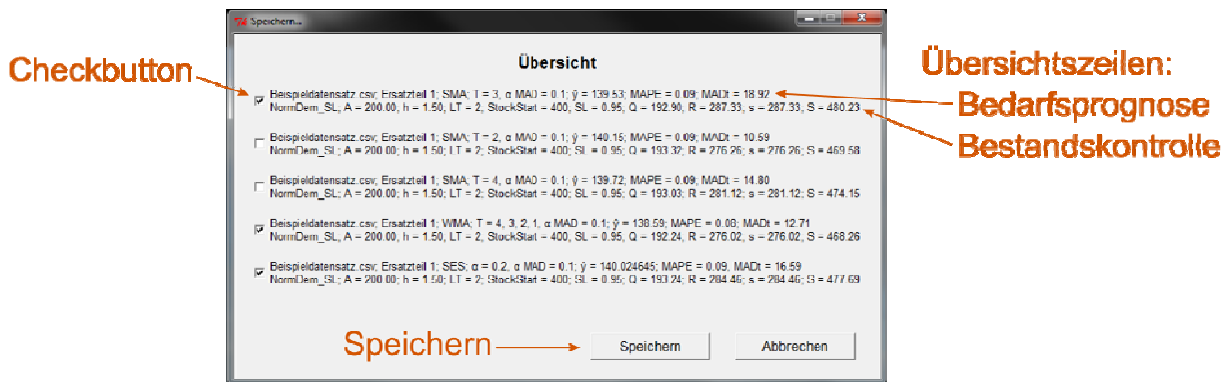


Bild 20: Auswahl der gewünschten Berechnung zur Speicherung in einer Excelarbeitsmappe

Für jede Berechnung wird eine Checkbox erstellt, deren Beschriftung alle wichtigen Informationen zu dieser Berechnung enthält. Hierbei fasst die erste der beiden Zeilen die Bedarfsprognose, die zweite die Lagerbestandskontrolle zusammen. Neben der Datei, aus denen die Daten stammen, sind der gewählte Datensatz sowie die gesetzten Berechnungsparameter und erhaltenen Ergebnisse dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind Abkürzungen und Symbole eingeführt worden, um eine eindeutige Identifizierung der gewünschten Berechnung zu ermöglichen. Eine Übersicht aller möglichen Abkürzungen und Symbole, wird in den beiden nachstehenden Tabellen dargestellt.

Tabelle 3: Abkürzungen und Symbole der Bedarfsprognose

Symbol, Abkürzung	Beschreibung
α, β, γ	Glättungsparameter von SES, DES und TES
$MAPE, MAD_t$	Aktuelle Fehlermaße der Prognosemethode
T	Ordnung beziehungsweise Gewichte von SMA und WMA
$t - start$	Zeitperiode, in der Prognosemethode DES gestartet wird
$n(per)$	Anzahl der Saisons in TES
\hat{y}	Aktueller Prognosewert des Bedarfs

Tabelle 4: Abkürzungen und Symbole der Lagerbestandsplanung

Symbol, Abkürzung	Beschreibung
A	Fixe Bestellkosten
p	Strafkosten
h	Lagerhaltungskosten
Q, S	Losgrößen der Q,R- bzw. s,S-Bestellpolitik
R, s	Bestellpunkte der Q,R- bzw. s,S-Bestellpolitik
$StockStart$	Startwert des Lagerbestands
LT	Lieferzeit

Nachdem die gewünschten Ergebnisse über eine Checkbox ausgewählt und der Speichern Button erneut betätigt worden ist, öffnet sich ein „Speichern unter“ Dialogfenster, mit dem der Dateiname sowie das Speicherziel festgelegt werden. Das Format der Ausgabedatei ist hierbei derzeit auf eine Excel Arbeitsmappe des Formats *.xlsx begrenzt.

Jeder ausgewählte Datensatz wird samt gesetzten Parametern in ein eigenes Tabellenblatt geschrieben, dessen allgemeiner Aufbau in Bild 21 dargestellt ist.

SMA: Ersatzteil 1, Lagermethode: NormDem_SL											Parameter / Ergebnisse		
Zeit	Nachfrage	Bedarfsprognose	Abweichung	MADt	muLT	sigmaLT	batch_Q	reorder_R	batch_S	reorder_s	T = 3, α MAD = 0.1		
1	1	134,5	0	0	0	0	0	0	0	0	ŷ = 139.53		
2	2	106,8	0	0	0	0	0	0	0	0	A = 200.00		
3	3	129,2	0	0	0	0	0	0	0	0	h = 1.50		
4	4	153	123,5	-29,5	0	0	0	0	0	0	LT = 2		
5	5	149,1	129,67	-19,43	29,5	259,33	52,29	185,95	288,96	474,91	288,96	StockStart = 400	
6	6	158,3	143,77	-14,53	28,49	287,53	50,5	195,8	313,42	509,22	313,42	SL = 0.95	
7	7	132,9	153,47	20,57	27,1	306,93	48,03	202,3	328,92	531,22	328,92	Q = 192.90	
8	8	149,8	146,77	-3,03	26,44	293,53	46,87	197,83	314,96	512,79	314,96	R = 287.33	
9	9	140,3	147	6,7	24,1	294	42,72	197,99	310,96	508,95	310,96	s = 287.33	
10	10	138,3	141	2,7	22,36	282	39,64	193,91	296,28	490,19	296,28	S = 480.23	
11	11	152,2	142,8	-9,4	20,4	285,6	36,15	195,14	296,17	491,31	296,17		
12	12	128,1	143,6	15,5	19,3	287,2	34,2	195,69	295,82	491,51	295,82		

Bild 21: Aufbau der Ausgabedatei

Die linke Tabelle wird aus zwei Teilen gebildet: der linke enthält den zeitlichen Verlauf des zuvor eingelesenen Bedarfs, die berechnete Bedarfsprognosen sowie Abweichungen und den MAD. Der rechte Teil entspricht den Daten der Lagerbestandskontrolle. Hierbei werden der mittlere Bedarf und die Standardabweichung der als normalverteilt angenommenen Nachfrage während der Lieferzeit („muLT“ und „sigmaLT“), gefolgt von den Losgrößen und Bestellpunkten der Q,R- beziehungsweise der s,S-Politik gespeichert (vgl. Bild 21).

Neben der Tabelle zu den zeitlichen Verläufen befinden sich eine Übersicht der vom Anwender eingestellten Parameter sowie die aktuellen Schätzungen von Bedarfsprognose, Losgröße und Bestellpunkt.

9 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsprojekts ist die Entwicklung einer dynamischen Lagerbestandsplanung für Ersatzteile des Antriebsstrangs von WEA. Dazu werden im Projekt Datenaufnahmen, Expertenbefragungen und die Entwicklung eines Planungswerkzeuges durchgeführt.

Die Zusammenfassung des Stands der Technik im Bereich der Ersatzteilprognose und -planung zeigt das Fehlen methodischer Ansätze in der Unternehmenspraxis der Ersatzteilversorgung von Antriebssträngen in WEA auf. Darum werden die wichtigsten zeitreihenanalytischen Prognosemethoden mit einer servicelevelbasierten Planungsmethode in einem Planungswerkzeug für den Einsatz in KMU abgebildet. Dazu zählen zeitreihenanalytische Verfahren und wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden. Erstgenannte sind unter Beachtung des Bedarfsverlaufs anzuwenden und im Prognosewerkzeug abgebildet. Die wahrscheinlichkeitstheoretischen Ansätze werden in ihrer Anwendbarkeit analysiert und exempla-

risch getestet. Für die Ersatzteilplanung werden die Randbedingungen in der Kostenfunktion abgebildet, um die bisher vorhandenen Ansätze weiterzuentwickeln. Da die im PA beteiligten Mitglieder zusätzlich zur Analyse der Versorgung von Offshore-WEAs Analysebedarf von Onshore-WEA sehen, fließen Randbedingungen von Onshore und Offshore-WEAs in die Entwicklung des Prognosewerkzeugs ein. Mit dem entwickelten Verfahren können Unternehmen eine dynamische Anpassung der Lagerbestände in Abhängigkeit der Anlagenzugänglichkeit durchführen.

Eine Herausforderung in der unternehmerischen Praxis stellt die Datenbasis mit vorliegenden Vergangenheitsdaten zu Materialbedarfen dar. Vergangenheitsdaten liegen, sofern vorhanden, im Excelformat vor und Unternehmen können diese nicht ohne weitere Bearbeitungsschritte für eine automatisierte Auswertung nutzen. Die im Prognosewerkzeug enthaltenen Algorithmen zur Prognose, Planung und dynamischen Anpassung der Bestände könnten bei automatisierter Einbeziehung aller vorhandenen Daten zu einer Wirtschaftlichkeitssteigerung beitragen. Dabei sind jeweils die Marktbegebenheiten zur Materialverfügbarkeit zu berücksichtigen.

Unternehmen der Windenergiebranche erschließen mit dem Prognosewerkzeug wirtschaftliche Potentiale für Komponenten, die eine Bedarfshistorie aufweisen. Durch Weiterentwicklung der Kostenfunktionen zur Berechnung des kostenminimalen Servicelevels können Unternehmen zusätzliche Kosteneinsparungen erzielen und einen wirtschaftlicheren Betrieb von Windenergieanlagen realisieren.

10 Literatur

- [ABR08] Abernethy, Robert B.: The New Weibull Handbook. 5. Aufl., Robert B. Abernethy Publishing, 2006.
- [AXS06] Axsäter, S.: Inventory Control. Springer, 2006.
- [BAY63] Bayes, T.: An Essay towards solving a Problem in the Doctrine of Chances. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Nr. 53, 1763, S. 370 - 418.
- [BEC78] Beckmann, D. G.; Marx: Instandhaltung von Anlagen – Methoden, Organisation, Planung. 3. Aufl.: DEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1978.
- [BIE08] Biedermann, H.: Ersatzteilmanagement – Effiziente Ersatzteillogistik für Industrieunternehmen. Springer, 2008.
- [BUN10] Presse und Informationsamt der Bundesregierung: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Hrsg.: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) Öffentlichkeitsarbeit, Berlin, 2010.
- [BUN11] Presse und Informationsamt der Bundesregierung: Energiewende - die einzelnen Maßnahmen im Überblick.
<http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2011/06/2011-06-06-energiewende-kabinett-weitere-informationen.html>.
Zuletzt abgerufen am 31.08.2011.
- [CAS05] Cassady, R.; Kutanoglu, E.: Integrating Preventive Maintenance Planning and Production Scheduling for a Single Machine. IEEE Transactions on Reliability, Jahrgang 54, Heft 2, 2005.
- [CHE01] Chelbi, A.; Aït-Kadi, D.: Spare provisioning strategy for preventively replaced systems subjected to random failure. Int. J. Production Economics, 2001. S. 183 - 189.
- [CRO72] Croston, D.: Forecasting and Stock Control for Intermittent Demands, In: Operational Research Quarterly, Volume 23, 1972, S. 289 - 303.
- [DEI08] Deibel, S.: Python. <https://www.python.org/>, 2008.
Zuletzt abgerufen am 2. Juni 2014.
- [DEK98] Dekker, R.; Kleijn, M., J.; de Rooij, P., J.: A spare parts stocking policy based on equipment criticality. In: Int. J. Production Economics, Jahrgang 56 - 57,

- 1998, S. 69 - 77.
- [DIE09] Dietrich, E.: Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation. 6. Aufl., Hanser, 2009.
- [DIN03] DIN 31051: Grundlagen der Instandhaltung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.
- [DIN08] DIN EN 61649: Weibull Analyse. Beuth Verlag GmbH, 2008.
- [ELS11] Eisenheimer, W.: Availon GmbH, Interview vom 26.08.11, Rheine.
- [EPS54] Epstein, B.; Sobel, M.: Some Theorems Relevant to Life Testing from an Exponential Distribution. In: The Annals of Mathematical Statistics. Nr. 25, 1954, S. 373 - 381.
- [EVW08] Abschlussbericht des Verbundprojekts Erhöhung der Verfügbarkeit von Windkraftanlagen. Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES, Kassel, 2008.
- [FRA10] Franken, M.; Trechow, P.; Kaluza, M.; Matook, S.: BWE Marktübersicht Spezial - Offshore: Service und Wartung. 1. Aufl., Bundesverband WindEnergie e.V., 2010.
- [GAS07] Gasch, R.; Twele, J.: Windkraftanlagen - Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb. 5. Aufl., Teubner, 2007.
- [GHO05] Ghodrati, B.: Reliability and Operational Environment Based Spare Parts Planning. Lulea University of Technology, 2005.
- [GHO14] Gohlke, C.: Unofficial Windows Binaries for Python Extension Packages. von <http://www.lfd.uci.edu/~gohlke/pythonlibs/>. Zuletzt abgerufen am 2. Juni 2014.
- [HAR09] Hartung, J.: Statistik – Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. 15. Auflage, Oldenbourg, 2009.
- [HAR97] Hartmann, H.: Materialwirtschaft: Organisation, Planung, Durchführung, Kontrolle. 7. Aufl., Hrsg.: Gernsbach, Dt. Betriebswirte-Verlag, 1997.
- [HAU08] Hau, E.: Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. 4. Auflage, Springer, 2008.
- [HEI10] Heinecke, O.: Wir sind sehr wetterabhängig. In: Logistik Heute, HUSS, Heft 10, 2010, S. 63.
- [HUN02] Hunter, J.: matplotlib. <http://matplotlib.org/index.html>, 2002.

Zuletzt abgerufen am 10. Juni 2014.

- [KLA09] Klaus, W. P.; Krieger: GABLER LEXIKON LOGISTIK: Management logistischer Netzwerke und Flüsse. 4. Aufl., Gabler/ Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2009.
- [KLE05] Kleinbaum, D.,G.; Klein, M.: Survival Analysis. 2. Aufl., Springer Science + Business Media, 2005.
- [KLE12] Kleesch, O.: Neues Konzept ermöglicht Großkomponentenwechsel ohne Schwerlastkran. In: Windenergie Service – Wartung und Instandhaltung Hrsg: Bundesverband WindEnergie (BWE), 1. Aufl., 2012, S. 56 - 61.
- [KOV11] Kovács, A.; et al.: A system for the detailed scheduling of wind farm maintenance. CIRP Annals - Manufacturing Technology 2011.
- [KUH11] Kuhfuß, B.; Moumi, E.; Tracht, K.; Weikert, F.; Vollertsen, F.; Stephen, A.: Process Chains In Microforming Technology Using Scaling Effects, 14th International ESAFORM Conference on Material Forming (ESAFORM 14), 2011, S. 535 - 540.
- [LAN10] Lanza, G.; Behmann, B.; Peters, S.: Verfügbarkeitswirksame technische Dienstleistungen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF, Hanser, Jahrgang 105, 2010, S. 421 - 425.
- [LIA10] Liao, H; Rausch, M.: Spare Part Inventory Control Driven by Condition Based Maintenance. In: IEEE 2010 Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS).
- [LÜB10] Lübke, K.; Stöbener, D.; Freyberg, A.; Fuhrmann, M.; Goch, G.: Schnelle Ersatzteilerfertigung für Großverzahnungen in Windenergiegetrieben. In: Industrie Management, Nr. 5, GITO Verlag, 2010, S. 51 - 54.
- [MAN07] Manwell, J.F.; Elkinton, C.N.; Rogers, A.L.; McGowan, J.G.: Review of design conditions applicable to offshore wind energy systems in the United States. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, American Institute of Physics Jahrgang 11, Heft 2, 2007, S. 210 - 234.
- [MEI05] Meintrup, D.; Schäffler, S.: Stochastik – Theorie und Anwendung. Springer, 2005.
- [MHA12] Mhammond. Python for Windows extensions, 2012.
<http://sourceforge.net/projects/pywin32/?source=navbar>.
Zuletzt abgerufen am 2. Juni 2014.

- [MOL11] Molly, J. P.: Status der Windenergienutzung in Deutschland. DEWI GmbH, 2011.
- [MOR11] Morgan, E.; Lackner, M.; Vogel, R., Baise, L.: Probability distributions of off-shore wind speeds, In: Energy Conversion Management, Elsevier, Jahrgang 52, Heft 1, 2011.
- [NIE11] Nielsen J., J.; Sorensen, J.: On Risk-based Operation and Maintenance of Offshore Wind Turbine Components. In: Reliability Engineering and System Safety, Jahrgang 96, Heft 1, 2011, S. 218 - 229.
- [NIL05] Nilsson, J.; Bertling, L.: Maintenance Management of Wind Power Systems Using Condition Monitoring Systems-Life Cycle Cost Analysis for Two Case Studies. In: IEEE Transactions on Energy Conversion, Jahrgang 22, Heft 1, 2005, S. 223 - 229.
- [NN12] N.N.: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien -nicht amtliche Fassung 2012.
- [NYH03] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Springer, 2003.
- [o.V13a] Ausgefüllter Fragenkatalog, Zusendung am 05.12.2013.
- [o.V13b] Geführtes Telefoninterview vom 04.12.2013, 15.00 bis 15.45 Uhr.
- [o.V13c] Geführtes Telefoninterview vom 04.12.2013, 10.00 bis 10.50 Uhr.
- [o.V13d] Geführtes Telefoninterview vom 05.12.2013, 8.30 bis 9.15 Uhr.
- [PAR14] Parkin, T.: PyPI - the Python Package Index. <https://pypi.python.org/pypi>. Zuletzt abgerufen am 2. Juni 2014.
- [REM11] Reményi, C.; Staudacher, S.: MRO - Organisation der Produktion sowie von Produktionsplanung und -steuerung - Ein Blick in MRO- Betriebe mit dem Fokus auf Wartung, Reparatur und Instandsetzung. In: Werkstattstechnik online, Jahrgang 101, Heft 4, 2011, S. 242 - 248.
- [REP10] Repower: WEA-Grafik Antriebsstrang. http://www.repower.de/index.php?id=532&L=1%2F**%2FAnd%2F**%2F%28SELECT%2F**%2F1%29%3D1. Zuletzt abgerufen am 20.09.2010.
- [ROS33] Rosen, P.; Rammler, B.: The laws governing the fineness of powdered coal. In: Journal of the Institute of Fuels, Nr. 7, 1933, S. 246 - 249.

- [SCH11] Scholz-Reiter, B.; Heger, J.; Lütjen, M.; Schweizer, A.: A MILP for installation scheduling of offshore wind farms. In: International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, Jahrgang 5, 2011.
- [SCH14] Schuh, P.; Funke, L.; Tracht, K.: Cost optimal spare parts planning for wind energy systems. 7th International Scientific Symposium on Logistics, 4. - 5. Juni 2014.
- [SCK10] Schenk, M.: Instandhaltung technischer Systeme - Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs. Springer, 2010.
- [SEB06] Sebastian, H.-J.: Dynamische Gestaltung von Ersatzteilsystemen: Entwicklung eines ganzheitlichen Ansatzes unter integrierter Betrachtung von Prognoseverfahren, Netzwerkstrukturen und Bestandspolitiken. Forschungsprojekt Abschlussbericht, Aachen, 2006.
- [SHT10] Schütt, H.: Verbesserung der Planungsgrundlagen für kampagnengeprägte Supply Chains (SC) am Beispiel von Offshore- Windenergieanlagen (OWEA). Forschungsprojekt Abschlussbericht, Bremen, 2010.
- [STG10] Steingröver, K.: Germanischer Lloyd, Interview, durchgeführt am 15.09.2010.
- [STR12] Strunz, Matthias: Instandhaltung, Grundlagen - Strategien - Werkstätten, Springer Vieweg, 2012.
- [STZ09] Stolletz, R.; Pingel, H.; Heerig, C.: Szenariobasierte Ersatzteilbestandsplanung bei unsicherem Verschleiß. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF, Hanser, Jahrgang 104, Heft 3, 2009, S. 170 - 173.
- [TEM06] Tempelmeier, H.: Material-Logistik - Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning-Systemen. Springer, 6. Aufl., 2006.
- [THO05] Thonemann, U.: Operations Management. Pearson - Studium, 2005.
- [THO10] Thonemann, U.: Operations Management. Pearson - Studium, 2010.
- [TRA10a] Tracht, K.; Wrehde, J.; Kouamo, T.: Optimization of the material flow using the principles of the Toyota Production System, 43th International Conference on Manufacturing Systems (ICMS 10), 2010, S. 488 - 495.
- [TRA10b] Tracht, K.; Schneider, D.; Schuh, P.: A feedback control system for spare parts logistic networks in the field of civil aviation. In: 7th CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME

'10, Capri 23 - 25 June 2010.

- [TRA10c] Tracht, K., Schenck, C., Weikert, F., Kuhfuß, B.: Förderung mikrokaltungeformter Bauteile im Verbund, wt Werkstatttechnik online, Jahrgang 100, Nr. 11/12, 2010, S. 864 - 868.
- [TRA11a] Tracht, K.; Kouamo, T.: Optimierung der Instandhaltungsplanung von Onshore-Windenergieanlagen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF, Hanser, Jahrgang 106, Heft 01/02, 2011, S. 75 - 79.
- [TRA11b] Tracht, K.; Goch, G.; Schuh, P.; Westerkamp F. J.; Sorg, M.; Bredemeier, C.: Zustandsorientierte Instandhaltung von Windenergieanlagen, 6. VDI-Fachtagung Schwingungsüberwachung, Leonberg, 2011, S. 33 - 45.
- [TRA12] Tracht, K.; Schuh, P.; Maier, J.: Stochastische Einflüsse auf die Instandhaltung von Windenergieanlagen. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 107, 2012, S. 99-103.
- [TRE11] Trechow, P.: "Mondlandung" mit Getriebebeschaden. In: VDI Nachrichten, VDI Verlag, Nr. 23, 11.06.11, S. 3.
- [UBA11] Umweltbundesamt: <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodent=2850>.
Zuletzt abgerufen am 28.07.11.
- [VAU05] Vaughan, T.: Failure replacement and preventive maintenance spare part ordering policy. In: European Journal of Operational Research, Jahrgang 161, 2005, S. 183 - 190.
- [VDM09] VDMA et al.: Dienstleistungen im Maschinenbau. In: Tagungsband „Wachstumspotenziale – Integration von Sachgütern und Dienstleistungen“, Esslingen, 2009.
- [WAL11] Walter, K.: Aufwind für Windkraft. In: Logistik Heute, HUSS-Verlag, Heft 4, 2011, S. 42 - 43.
- [WAN11] Wang, W.; Syntetos, A.: Spare parts demand - Linking forecasting to equipment maintenance. In: Transport. Res. Part E, 2011.
- [WEB09] Weber, T.: Aufholjagd der Etablierten. In: neue Energie, 03, 2009, S. 44 - 52.
- [WEB10] Weber, T.: Windmühlenversther. In: neue Energie, 06, 2010, S. 44 - 47.
- [WLS12] o.V.: wir-lieben-segeln.de.
<http://www.wir-lieben-segeln.de/theorie/wetter/beaufort-skala>.
Zuletzt abgerufen am 25.04.2012.