

**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg**  
**Fakultät Life Sciences**

**Energiemanagement in der Seeschifffahrt**  
**Eine Analyse energetischer Routenprofile**

Bachelor Thesis  
im Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von

**Mario Armah**



Ort der Abgabe  
Hamburg  
am 26. Juni 2012

**Gutachter:** Prof. Dr. Juriy Plotkin

**Gutachter:** Dipl.-Ing. (FH) Thomas Frank

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt in Zusammenarbeit mit der Firma Envidatec GmbH.

## **Danksagung**

Ich möchte mich hiermit bei Prof. Dr. Juriy Plotkin für seine Ratschläge und seine Betreuung bedanken.

Vielen Dank auch an Herrn Nils Heinrich als Projektverantwortlichen, der klare Ziele formuliert hat.

Vielen Dank an Herrn Thomas Frank meinen Betreuer, der stets offen für Fragen war und für die Möglichkeit eine interessante, anspruchsvolle Abschlussarbeit in seinem Unternehmen schreiben zu dürfen.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich in jeder erdenklichen Weise unterstützt hat, insbesondere bei meiner Mutter.

Die Bachelorarbeit wurde im Unternehmen erstellt bei:

Envidatec GmbH

Veritaskai 2

21079 Hamburg

Firmenbetreuung: Dipl.-Ing. (FH) Thomas Frank

## Vorwort

Die Steigerung der Energiepreise, die knapper werdenden Ressourcen und vor allem die zunehmenden Auswirkungen des anthropogenen Treibhauseffektes, erfordern zur Abmilderung der negativen Konsequenzen eine Optimierung der Effizienz in Bereichen, die bisher wenig im Fokus von Energieeinsparmaßnahmen standen.

Die Seeschifffahrt produziert laut Marine Environment Protection Committee (MEPC) 2,7% (im Jahr 2007) ( International Maritime Organization, 2009), nach einer OECD-Studie 2-3% (Endresen Øyvind, 11/2008) und momentan schätzungsweise 4-5% vom weltweiten jährlichen CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub> Ausstoß.

Den größten Anteil verursacht mit 75% die Containerschifffahrt. Daraus folgt das eine Verminderung des Energieverbrauches, die größten Effekte im Bereich der Containerschifffahrt hat.

Diese Arbeit verfolgt das Ziel einen weiteren Schritt zur Verringerung des Energieverbrauches in diesem Bereich und einen ökologisch nachhaltigen Beitrag zu leisten. Die Motivation liegt in der Aufgabe zur Verbesserung der Energieeffizienz in der Seeschifffahrt beizutragen.

# 1 Inhalt

2	Abbildungsverzeichnis .....	6
3	Tabellenverzeichnis .....	7
4	Formelverzeichnis.....	7
5	Abkürzungsverzeichnis .....	8
6	Einleitung.....	9
7	Regulierungen des Marine Environment Protection Committee .....	11
7.1	Einführung des Ship Energy Efficiency Management Plan.....	11
7.2	Der Unternehmensplan Company Energy Efficiency Management Plan .....	12
7.3	Inhalt des Ship Energy Efficiency Management Plan.....	12
7.3.1	Betroffene Schiffstypen .....	13
7.4	Umsetzung des Ship Energy Efficiency Management Plan .....	13
7.4.1	Die Stufenweise Implementierung.....	14
7.5	Key Performance Indicator .....	15
7.6	Entwicklungen im Schifffahrtsbereich .....	17
7.7	Green Shipping.....	18
7.8	FutureShip .....	18
8	Routenoptimierung.....	19
8.1	Ziele der Routenoptimierung.....	19
9	Messtechnik.....	21
10	Das Hidden Markov Modell.....	23
10.1	Grundlegende Definitionen eines Hidden Markov Models .....	25
10.2	Beispiel eines Hidden Markov Models .....	26
10.3	Auswertung des Hidden Markov Models.....	30
10.4	Der Viterbi-Algorithmus.....	31
10.4.1	Underflow der Pfadwahrscheinlichkeiten.....	33
10.5	Der Baum-Welch-Algorithmus .....	33
10.5.1	Forward-Algorithmus .....	34
10.5.2	Backward-Algorithmus .....	36
10.5.3	Kombination Forward-Backward-Algorithmus .....	37
11	Umsetzung mit Matlab und Octave.....	40
11.1	UML-Aktivitätsdiagramm Viterbi-Algorithmus.....	40
11.2	UML-Aktivitätsdiagramm Baum-Welch-Algorithmus .....	42
12	Auswertung der Routenprofile .....	45

13	Diskussion .....	55
14	Perspektiven und Ausblick des Projektes .....	56
15	Selbstständigkeitserklärung .....	57
16	Literaturverzeichnis.....	58
17	Anhang .....	60
17.1	Programm Viterbi-Algorithmus.....	60
17.2	Programm Baum-Welch-Algorithmus.....	63
17.2.1	Hauptprogramm .....	63
17.2.2	Forward-Algorithmus .....	65
17.2.3	Backward-Algorithmus .....	67
17.2.4	Forward-Backward-Algorithmus .....	68
17.2.5	Evaluierung Forward-Backward-Algorithmus .....	69

## 2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Maschinenraum eines Containerschiffs .....	10
Abbildung 2: kontinuierlicher Verbesserungsprozess PDCA-Zyklus.....	13
Abbildung 3: Messtechnik des Containerschiff .....	22
Abbildung 4: Energetische Startzustände.....	26
Abbildung 5: Zustandsübergänge.....	27
Abbildung 6: Emittierung der Beobachtungen aus den energetischen Zuständen ...	28
Abbildung 7: Verknüpfung von Übergängen und Emissionen .....	28
Abbildung 8: Zustandsübergänge und Emissionen im Trellis-Diagramm .....	29
Abbildung 9: Wahrscheinlichster Pfad des Brute-Force-Algorithmus .....	30
Abbildung 10: Beispiel eines Pfades berechnet mit dem Viterbi-Algorithmus.....	32
Abbildung 11: Beispiel Berechnung eines Knotens mit dem Forward-Algorithmus ..	35
Abbildung 12: Beispiel Berechnung eines Knotens mit dem Backward-Algorithmus	36
Abbildung 13: Beispiel Berechnung mit dem Forward-Backward-Algorithmus .....	38
Abbildung 14: UML-Aktivitätsdiagramm des Viterbi-Algorithmus.....	40
Abbildung 15: UML-Aktivitätsdiagramm des Baum-Welch-Algorithmus .....	42
Abbildung 16: Festlegung der Startwerte des Baum-Welch-Algorithmus .....	46
Abbildung 17: Konvergenz nach fünf Durchgängen .....	46
Abbildung 18: Konvergenz nach zehn Durchgängen.....	46
Abbildung 19: Konvergenz nach 20 Durchgängen .....	46
Abbildung 20: Energetische Bewertung von Route 1 .....	48
Abbildung 21: Energetische Bewertung von Route 2 .....	48
Abbildung 22: Energetische Bewertung der Route 3.....	48
Abbildung 23: Energetische Bewertung der Route 7 .....	48
Abbildung 24: Häufigkeiten der energetischen Zustände von Route 7 .....	50
Abbildung 25: Energetische Zustände der Streckenabschnitte von Route 7 .....	50
Abbildung 26: Häufigkeiten der energetischen Zustände von Route 3.....	51
Abbildung 27: Energetische Zustände der Streckenabschnitte von Route 3.....	52
Abbildung 28: Energetisches Routenprofil von Route 3 großer Kartenausschnitt ....	53
Abbildung 29: Energetisches Routenprofil von Route 3 kleiner Kartenausschnitt ....	54

### 3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Key Performance Indicator .....	16
Tabelle 2: Unterteilung der Messungen des Treibstoffverbrauchs.....	45

### 4 Formelverzeichnis

Formel 1: EEDI-Formel.....	12
Formel 2: KPI-Werteformel.....	16
Formel 3: KPI-Bewertungsformel.....	16
Formel 4: SPI-Werteformel.....	16
Formel 5: Energy Efficiency Operational Indicator-Formel .....	17
Formel 6: Evaluierung eines Hidden Markov Models .....	29
Formel 7: Maximale Wahrscheinlichkeit einzelner Pfad eines HMM .....	31
Formel 8: Induktion Viterbi-Algorithmus.....	31
Formel 9: Initialisierung Viterbi-Algorithmus .....	31
Formel 10: Rekursion Viterbi-Algorithmus .....	31
Formel 11: Terminierung Viterbi-Algorithmus .....	32
Formel 12: Backtracking Viterbi-Algorithmus.....	32
Formel 13: Definition der Wahrscheinlichkeit des Zustands $s(i)$ zum Zeitpunkt $t$ .....	33
Formel 14: Zustandsübergangswahrscheinlichkeit Baum-Welch-Algorithmus .....	34
Formel 15: Zustandswahrscheinlichkeit Forward-Algorithmus.....	34
Formel 16: Wahrscheinlichkeit des Startzustands Forward-Algorithmus.....	34
Formel 17: Induktion Forward-Algorithmus.....	35
Formel 18: Terminierung Forward-Algorithmus .....	35
Formel 19: Bedingte Wahrscheinlichkeit der Beobachtung aus dem Zustand.....	36
Formel 20: Initialisierung Backward-Algorithmus.....	36
Formel 21: Induktion Backward-Algorithmus .....	36
Formel 22: Kombination Forward/-Backward-Algorithmus .....	37
Formel 23: Terminierung Forward-Backward-Algorithmus .....	37
Formel 24: Erwartete Anzahl der Übergänge nach $s_i$ .....	38
Formel 25: Erwartete Anzahl der Übergänge von $s_i$ nach $s_j$ .....	39
Formel 26: Berechnung der neuen Startwahrscheinlichkeiten $\pi_i^*$ .....	39
Formel 27: Bildung neuer Wahrscheinlichkeiten der Zustandsübergänge $a_{ij}^*$ .....	39
Formel 28: Bildung neuer Beobachtungswahrscheinlichkeiten $b_{j(k)}^*$ .....	39

## 5 Abkürzungsverzeichnis

BRZ - Bruttoreaumzahl

CEEMP - Company Energy Efficiency Management Plan

DIN - Deutsche Institut für Normung

EEDI - Energy Efficiency Design Index

EEOI - Energy Efficiency Operational Index

EN - Europäische Norm

EnMS - Energiemanagementsystem

GT - gross tonnage

HMM - Hidden Markov Modell

IMO - International Maritime Organization

ISO - Internationale Organisation für Normung

JE - Java Envidatec

JEDB - Java Envidatec Database

JEGIS - Java Envidatec Geographic Information System

JEGraph - Java Envidatec Graph

JEVis - Java Envidatec Visualization

kn - Knoten

KPI - Key Performance Indicator

MARPOL - International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships

MEPC - Marine Environment Protection Committee

PDCA Zyklus - Plan-Do-Check-Act Zyklus

PI - Performance Indicator

SEEMP - Ship Energy Efficiency Management Plan

sm - Seemeile

SPI - Ship Performance Indicator

TEU - Twenty-foot Equivalent Unit (Standardcontainer 20 Fuß)

TSP - Traveling Salesman Problem

UML - Unified Modeling Language

## 6 Einleitung

Die Firma Envidatec GmbH ist 2001 aus der Firma Nodus GmbH hervorgegangen, die zum E.ON-Konzern gehörte. Bereits die Nodus GmbH beschäftigte sich mit Energieoptimierung durch Steigerung der Energieeffizienz und Energieeinsparung und der Entwicklung von Monitoring-Hardware zu deren Überwachung. Unterschiedliche Ausrichtungen des Konzerns führten zur Gründung des eigenständigen Unternehmens Envidatec GmbH.

Bei der Schaffung gesetzlicher Rahmenbestimmungen und Leitfäden zur Energieberatung, hat die Envidatec GmbH ihre Energieeffizienz-Analysen 2009 den Anforderungen der verabschiedeten Europäischen Norm DIN EN 16001 angepasst. Eine Erweiterung der Firma erfolgte 2010 aufgrund des großen Optimierungspotenziales in den ehemaligen GUS-Staaten, mit der Gründung der Envidatec Ost.

Die ab April 2012 gültige internationale Norm DIN EN ISO 50001, die die DIN EN 16001 ablöst und bis auf Details, dieselben Strukturen zur Umsetzung eines nachhaltigen Energiemanagementsystems fordert, ist bereits seit Anfang 2012 Beratungsstandard der Envidatec GmbH.

Für die Envidatec GmbH als Dienstleistungsunternehmen geht es um innovative Ansätze im Bereich des Energiemanagements und der Energieeinsparung. Hierzu gehört auch die enge Zusammenarbeit mit Hochschulen und Forschungseinrichtungen und weiteren Hochschulen im Rahmen von Forschungsprojekten. Hierzu zählen beispielsweise:

1. Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg
2. Technische Universität Hamburg
3. Technische Universität Wien
4. Austrian Institute of Technology
5. Perm Technical State University

Als die International Maritime Organization (IMO) erste Planungen für die Einführung eines Energiemanagementplans bekannt gab, war die Envidatec GmbH als Energiedienstleister an diesem Thema sehr interessiert. Energiemanagementpläne für Schiffe sind eine Erweiterung des derzeit bestehenden Produktportfolios.

Der Energiemanagementplan für die Seeschifffahrt basiert auf Grundlage bisheriger Managementsysteme. Für die Umsetzung sind systemtechnische Konzepte, Monitoring und Kontrolle von Leistungsindikatoren wichtige Bausteine. Auf Grundlage bisher gesammelter Erfahrungen im Landbereich erfolgt ein Transfer in den Schifffahrtsbereich. Hinzu kommt die Entwicklung neuer Produkte zur Steigerung der Energieeffizienz. Die Stadt Hamburg, als einer der größten europäischen Containerumschlagplätze verfügt über einen Standortvorteil und demzufolge sehr guten Marktzugang, mit anschließender Zuliefererindustrie. Im Rahmen eines Forschungsprojekts zum Energieverbrauch in der Seeschifffahrt wurde ein Containerschiff von der Envidatec GmbH mit Messtechnik ausgestattet.

( Envidatec GmbH, 11/2011)



**Abbildung 1: Maschinenraum eines Containerschiffs**  
**Messdaten-Abgriff an X vom Treibstoffverbrauch des Hauptantriebs**

## **7 Regulierungen des Marine Environment Protection Committee**

Den Energieverbrauch in der Seeschifffahrt zu reduzieren ist, trotz des im Verhältnis zu anderen Transportmitteln geringen Energieverbrauchs, notwendig. Im Juli 2011 kommt das Marine Environment Protection Committee (MEPC) zu dem Schluss hierfür Regulierungen zu treffen. Das ist erforderlich, weil Prognosen von einer starken Zunahme des weltweiten Handels ausgehen.

Die Anstrengungen der IMO starteten bereits Ende der 80er, um den FCKW-Ausstoß zu verringern, der aus Kühlschränken und Feuerlöschsystemen herrührte. Der Fokus änderte sich durch die zunehmende Verknappung der Ressourcen und durch den anthropogenen (vom Menschen verursachten Treibhauseffekt, im Gegensatz zum natürlichen) Treibhauseffekt. Da für Energieeinsparmaßnahmen Reedereien zunächst Investitionen tätigen müssen, die eine entsprechende Amortisationszeit haben, plant die IMO die Einführung von Energieeinsparmaßnahmen in moderaten Stufen.

(T5/1.01, GUIDANCE FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP), 08/2009)

### **7.1 Einführung des Ship Energy Efficiency Management Plan**

Das Marine Environment Protection Committee der IMO hat bei ihrer 62. Sitzung im Juli 2011 beschlossen, eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen ins International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships Abkommen (MARPOL) 73/78 Annex VI Chapter 4 zu übernehmen. Das Inkrafttreten wird zum 01.01.2013 erwartet und gilt für jedes im Betrieb befindliche Schiff mit mehr als 400 GT (gross tonnage). Diese müssen einen Energiemanagementplan für Schiffe oder Ship Energy Efficiency Managementplan (SEEMP) betreiben. Regelungen, die durch die IMO beschlossen werden, werden durch die Flaggenstaaten, die Länder unter deren Flagge ein Schiff fährt, durchgesetzt. Die einzige kostenlose und umweltschonende Energie ist diejenige, die nicht verbraucht wird. Dem wird durch die Einführung von Konstruktionsparametern die den Treibstoffverbrauch beeinflussen nachgekommen. Hierzu wird der Energy Efficiency Design Index (EEDI) eingeführt, welcher ein beim Bau des Schiffes festgelegter Design-Wert ist.

$$EEDI = \frac{\text{Leistung} * \text{spezifischer Treibstoffverbrauch} * \text{spezifischer Emissionsfaktor}}{DWT * \text{Geschwindigkeit}}$$

**Formel 1: EEDI-Formel**

(MEPC, 2009)

Jedes neugebaute Schiff muss den Energy Efficiency Design Index (EEDI) der die Konstruktionsparameter vereinigt einhalten. Das MEPC berät 2012 über Vorgaben für den EEDI den spezifischen Verbrauch eines Schiffstypen.

(Det Norske Veritas AS, 09/ 2011), (T5/1.01, GUIDANCE FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP), 08/2009), (International Maritime Organization, 07/2011), (MEPC, 2009)

## **7.2 Der Unternehmensplan Company Energy Efficiency Management Plan**

Der Company Energy Efficiency Management Plan (CEEMP) ist der unternehmensübergreifende Energiemanagement-Plan und somit global angelegt. Der CEEMP regelt die Einzelheiten des SEEMP-Prozesses. Er enthält den Überblick über die Effizienz der gesamten Flotte, Energieziele und zukünftige Erwartungen. Dazu gehört die Erstellung von Plänen und Zeitfenstern zur Umsetzung von Maßnahmen im Betrieb, die Erstellung von Vorgehensweisen und Anweisungen für die Auswertung und Ausfertigung zur Dokumentation auf Schiffen. Darüber hinaus enthält der CEEMP, die zur Verfügung gestellten Budgets und regelt die Verantwortlichkeiten auf See und an Land.

(Det Norske Veritas AS, 09/ 2011), (International Maritime Organization, 07/2011), (ABS Nautical Systems, 2012)

## **7.3 Inhalt des Ship Energy Efficiency Management Plan**

Das Referat der IMO T5/1.01 hat sich zur Erarbeitung der SEEMP-Mechanismen an der ISO 14001 (Umweltmanagementsystem) orientiert. Daher sind die Strukturen eines SEEMP, vergleichbar mit denen eines Umweltmanagementsystems nach ISO 14001. Der SEEMP dokumentiert einen zyklischen Managementprozess nach dem Plan-Do-Check-Act Cycle (PDCA-Zyklus) und ist hierbei zunächst weniger formell ausgestaltet. Der PDCA-Zyklus ist ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess. Mit dem SEEMP werden neue Prozesse und Arbeitsanweisungen zwecks

Treibstoffeinsparung eingeführt und verwirklicht. Ziel ist ein konsistentes und fundiertes Energiemanagementsystem.

(International Maritime Organization, 07/2011), (T5/1.01, GUIDANCE FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP), 08/2009)

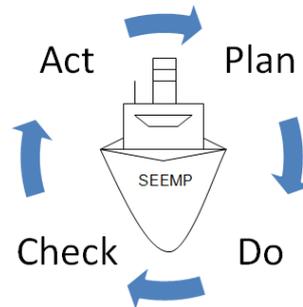


Abbildung 2: kontinuierlicher Verbesserungsprozess PDCA-Zyklus

### 7.3.1 Betroffene Schiffstypen

Hauptsächlich sind alle Schiffe, die Transportarbeit leisten betroffen. Dies sind vor allem Container-Schiffe, Kreuzfahrtschiffe und Fähren mit einer Brutto-Raum-Zahl (BRZ) > 400 GT (gross tonnage). Schiffe die nicht hauptsächlich Güter und Personen von A nach B transportieren, müssen den SEEMP nicht einführen. Hierzu zählen zum Beispiel Kriegs- oder Forschungsschiffe. Vom SEEMP betroffene Schiffstypen sind laut MEPC: dry cargo carriers, tankers, gas tankers, containerships, ro-ro cargo ships, general cargo ships, passenger ships including ro-ro passenger ships und Frachttypen: all gas, liquid and solid bulk, general, containerized, break bulk, heavy lifts, frozen and chilled goods, timber and forest products, carried on freight vehicles, cars and freight, vehicles on ro-ro ferries and passengers.

(International Maritime Organization, 07/2011)

### 7.4 Umsetzung des Ship Energy Efficiency Management Plan

Die Einführung von Energiemanagementsystemen erfolgt durch ein vereinheitlichtes Muster. Der Erfolg eines Managementsystems ist gegeben, sobald sich an die einzelnen Schritte hält, somit eine Frage nach dem Rückhalt und Engagement der einzelnen Unternehmensebenen. Das fängt bei der Firmenleitung an, welche die notwendigen Investitionen genehmigen, befähigtes Personal bereitstellen und Ziele formulieren muss. Dem Energieteam das die Firmenleitung über die notwendigen

Verbesserungen informiert, die Maßnahmen umsetzt und die Mitarbeiter aufklärt, motiviert und schult. Sowie den Mitarbeitern die diese Maßnahmen letztlich umsetzen und häufig eigene Verbesserungsvorschläge beisteuern.

(Lieback, 06/2011)

## 7.4.1 Die Stufenweise Implementierung

### Stufe 1 - Analyse und Planung

- Eine genaue Analyse der IST-Situation, um den Energieverbrauch, die energieintensiven Bereiche und deren Energieeffizienz festzustellen
- Eruiierung von Einsparpotenzialen und bereits vorhandener Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz
- Berechnung des Energy Efficiency Operational Index (EEOI) anhand vorhandener Betriebsparameter
- Planung der Energieziele, des zukünftig anvisierten Energieverbrauches und der Effizienz-Steigerung
- Erstellung eines SEEMP-Dokumentes pro Schiff

### Stufe 2 - Ausweitung der Auswertungstiefe

- Aufbau der Organe zum Betrieb des SEEMP
- Strukturieren und Dokumentieren der Energiepolitik
- Erweiterung vorhandener Streckenberichte und Erfolgsdarstellung, Art und Weise der Auswertung
- Definition von Schlüsselindikatoren Key Performance Indicator (KPI) für EEOI
- Erfassung aller relevanten Faktoren und falls notwendig Einführung eines Monitoringsystems

### Stufe 3 - Betrieb des SEEMP im PDCA-Zyklus

#### **Plan**

- Erkenntnisse und Formulierungen neuer Ziele und Maßnahmen, als erster Schritt des nächsten Zyklus in den SEEMP integrieren und somit dessen weitere Entwicklung vorantreiben
- Ableitung von Maßnahmen aus der Auswertung und den Streckenberichten

## **Do**

- Umsetzung von Maßnahmen
- Kontinuierliche Aufzeichnung der Messungen

## **Check**

- Optimierung einzelner Maßnahmen
- Auswertung und Fortschritt der einzelnen Verbesserungsmaßnahmen
- Darstellung erfolgreicher Maßnahmen und deren Umsetzung

## **Act**

- Interne Besprechungen zur Überprüfung der Effizienz des SEEMP
- Bewertung der Performance Indikatoren, der erzielten Verbesserungen und der Maßnahmen

(Lieback, 06/2011), (T5/1.01, GUIDANCE FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP), 08/2009)

## **7.5 Key Performance Indicator**

Für die Erstellung von Benchmarks, also Vergleichswerten einzelner Schiffstypen oder der Flotte, müssen Performance Indikatoren festgelegt werden. Diese werden nach den verschiedenen Bereichen, die auf einem Schiff vorkommenden zu erbringenden Leistungen gegliedert. Die Aufschlüsselung kann dabei verschiedene Grade der Tiefe erreichen, in Abhängigkeit von der Bedeutung für den Schiffsbetrieb. Nach Aufschlüsselung der Bereiche wird deren Leistung nach verschiedenen Aspekten in einer KPI-Matrix festgelegt. Diese werden je nach Aufgliederungstiefe in eine hohe Priorität (H) und eine niedrige Priorität (N) oder mit zusätzlichen Zwischenzuständen gewichtet.

(Baltic Exchange, Marintek, Intermanager, Norges Forskningsgrad, 09/2009)

Nach der Feststellung der relevanten Performance Indikatoren, deren Aspekten und Gewichtung, ergibt sich zum Beispiel die folgende KPI-Matrix.

**Tabelle 1: Key Performance Indicator**

**Tabelle zur Festlegung von Leistungsindikatoren als Vergleichswerte**

SPI/ KPI	Umwelt	HR	Sicherheit	Ausführung	Technisch	Navigation	Risiko
Energie/ kn	N	H	H	N	N	N	H
Energie/ sm	H	H					
Energie/ Container	N	N					H
Energie/ Hamburg-Shanghai	N						
Energie/ kWh		H	N		H		H
Energie/ €	H	H			N	N	H
Energie/ BRZ	H						
Energie/ kW	H						H
Energie/ Stunde		N				H	
CO <sub>2</sub> / Energie	H				H		H

(Baltic Exchange, Marintek, Intermanager, Norges Forskningsgrad, 09/2009)

**Beispiel:**

$$\text{KPI Werteformel} = \frac{\text{Treibstoffverbrauch}}{\text{gefahrne Strecke} * \text{Fracht}}$$

**Formel 2: KPI-Werteformel**

(Baltic Exchange, Marintek, Intermanager, Norges Forskningsgrad, 09/2009)

$$\text{Bewertungsformel} = 100 - Z * \text{KPI}, 0 \leq \text{KPI} \leq 100$$

**Formel 3: KPI-Bewertungsformel**

Bewertungsparameter Z = muss festgelegt werden

(Baltic Exchange, Marintek, Intermanager, Norges Forskningsgrad, 09/2009)

$$\text{SPI} = \frac{N * \sum(\text{KPI}_{N\text{-gewichtet}}) + H * \sum(\text{KPI}_{H\text{-gewichtet}})}{\sum N + H}$$

**Formel 4: SPI-Werteformel**

(Baltic Exchange, Marintek, Intermanager, Norges Forskningsgrad, 09/2009)

Der Ship Performance Index (SPI) gibt letztendlich die Schiffsperformance wieder. Die SPIs können für schiffsübergreifende Vergleiche genutzt werden.

Der Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) ist in der einfachsten Form Verhältnis Masse CO<sub>2</sub> zu Transportarbeit. Mit den Parametern Treibstoffverbrauch (pro Periode, Beispiel Tag) und zurückgelegte Entfernung in nautischen Meilen.

$$EEOI = \frac{mCO_2}{Transportarbeit}$$

**Formel 5: Energy Efficiency Operational Indicator-Formel**

(T5/1.01, GUIDELINES FOR VOLUNTARY USE OF THE SHIP ENERGY EFFICIENCY OPERATIONAL INDICATOR (EEOI), 08/2009)

Zur genaueren Analyse kann der EEOI genauer aufgeschlüsselt werden.

(Baltic Exchange, Marintek, Intermanager, Norges Forskningsgrad, 09/2009), (Carbon positive, 2011), (Det Norske Veritas AS, 09/ 2011), (Esantos, 10/2011), (E. Günther, Nr.22/2006), (Hennig, 10/2011), (HypoVereinsbank- Global Shipping Division, 2008), ( International Maritime Organization, 2009), (Lieback, 06/2011), (T5/1.01, GUIDANCE FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP), 08/2009), (T5/1.01, GUIDELINES FOR VOLUNTARY USE OF THE SHIP ENERGY EFFICIENCY OPERATIONAL INDICATOR (EEOI), 08/2009), (Moosmayer, 01/2011 ), (Bunk D. M., 20/2011), (ABS Nautical Systems, 2012), (Bunk D. , 02/2011)

## 7.6 Entwicklungen im Schifffahrtsbereich

Die MEPC hat zur Umsetzung von Energieeinsparmaßnahmen einen Katalog mit folgenden Vorschlägen vorgelegt.

Technisch:

1. Verringerung des Widerstandes durch Einblasen von Luft unter dem Schiff
2. Effizientere Motoren
3. Abwärmenutzung
4. E-Management für den Antrieb

Operativ:

1. Trimmungsoptimierung
2. **Routenoptimierung**
3. Just-in-Time Arrival
4. Regelmäßige Wartungen und Säuberungen
5. Drosselung der Geschwindigkeit

6. Optimierung der Beladung

7. Optimierung der Wellenleistung

(T5/1.01, GUIDANCE FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP), 08/2009)

## **7.7 Green Shipping**

Im Rahmen der Green Shipping-Studie der Hypovereinsbank werden verschiedene Ansätze diskutiert, die eine Reduzierung des Treibstoffverbrauchs zur Folge haben. Da im Schiffsbereich Schweröle, die sonst nicht weiter Verwendung finden, eingesetzt werden, sind alternative Treibstoffe in der Diskussion. Hierzu zählen Erdgas, Biodiesel und Biogas. Diese emittieren wesentlich weniger schädliche Substanzen wie Stickoxide und Schwefeloxide in die Umwelt. Des Weiteren wird der Einsatz von Elektrolyse-Wasserstoff aus Photovoltaikanlagen oder Windkraftanlagen vorgeschlagen. Eine Steigerung der Effizienz derzeitiger Dieselaggregate, sowie Hybridanlagen sollen ebenfalls einen Beitrag leisten. Bei den Motoren gibt es Überlegungen zum Elektroantrieb und Brennstoffzellen. Aufgrund der Konversionsverluste sind Überlegungen zur Installation von Photovoltaikanlagen direkt auf dem Schiff vorhanden. Der Ansatz der Hamburger Firma SkySails GmbH möchte direkt die Windenergie, durch Einsatz eines Zugdrachens verwerten. Weitere Ansätze der Studie zählen zu den von der MEPC vorgeschlagenen Maßnahmen.

(HypoVereinsbank- Global Shipping Division, 2008)

## **7.8 FutureShip**

Vom globalen Zertifizierer Germanischer Lloyd wurde die Firma FutureShip GmbH gegründet, die sich mit dem Thema der Energieeinsparung in der Seeschifffahrt beschäftigt. Mit dem Eco Assisstant wurde ein Software-Tool entwickelt, mit dem sich die Trimmung optimieren lässt, also die Auslage des Schiffes im Wasser. Des Weiteren wurde eine Analysesoftware aus dem sich ineffiziente Bereiche und Maßnahmen ableiten lassen und einem Design-Tool zur Strömungsanalyse am Schiffskörper entwickelt. Ein Tool zur Berechnung der Kräfte, die sich aufgrund des Schiffdesigns und äußerer Bedingungen ergeben ist ebenfalls vorhanden.

Die derzeitigen Entwicklungen im Seeschiffbereich zeigen, dass viele Unternehmen unterschiedlichste innovative Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz verfolgen und diese meist den Vorschlägen der MEPC entsprechen.

(FutureShip GmbH), (FutureShip GmbH, 2012), (FutureShip GmbH, 2012), (FutureShip GmbH)

## **8 Routenoptimierung**

Eine der Maßnahmen, die die MEPC vorschlägt, ist die Routenoptimierung. Da diese Maßnahme nicht konstruktiver Natur ist, lässt sie sich auch bei im Einsatz befindlichen Schiffen umsetzen. Zudem wird der Schiffsbetrieb nicht eingeschränkt. Die Routenoptimierung bindet wenige Ressourcen und ist weniger störanfällig, wie neue technische Maßnahmen, wie Elektromotoren mit Brennstoffzellen oder Lufteinblasen unter dem Schiff. Zudem sind die Investitionskosten im Vergleich zu technischen Lösungen gering. Routenoptimierung ist des Weiteren von Planungsseite her Standort unabhängig. Die MEPC bewertet das Einsparpotenzial auf 1-10% des Energieeinsatzes. Bei den sehr großen Mengen an Treibstoff ist selbst ein halbes Prozent in der Summe allen Verbrauches eine lohnenswerte Einsparung. Ein Daumenwert für den Verbrauch bei mittlerer Geschwindigkeit und Beladung eines 8000 TEU-Containerschiffes sind 80 Tonnen Schweröl auf der ungefähr 530 km langen Fahrt von Hamburg nach Rotterdam laut Auskunft der kooperierenden Reederei.

Zur Routenoptimierung sind nach Verkehrsmittel und Zielsetzung verschiedene Ansätze vorhanden.

### **8.1 Ziele der Routenoptimierung**

Eine Optimierung der Route hängt zunächst von der Zielsetzung ab. Bei der Urlaubsplanung geht die optimale Route entlang vieler Sehenswürdigkeiten, in der Schifffahrt werden sichere Routen geplant (Riffe, Piraten, Witterung), während ein Geschäftstermin die schnellste Verbindung bevorzugt.

Der Großteil der Routenoptimierungen verfolgt das Ziel des kürzesten oder des schnellsten Weges. Hierzu gibt es zahlreiche Algorithmen. Beispielsweise findet bei dem Dijkstra-Algorithmus eine Gewichtung von Knoten, die einen Ort repräsentieren

statt. Danach wird deren kürzester Weg zu allen anderen Knoten berechnet. Der A\*-Algorithmus filtert den kürzesten Weg aus einer Vielzahl an Pfaden. Dies führt zu einer großen Anzahl an Berechnungen.

(Weinard, 2007)

Das Problem des Handelsreisenden, das sogenannte Traveling-Salesman-Problem (TSP) wird oft in diesem Zusammenhang genannt. Ziel ist es möglichst viele Orte, mit möglichst geringem Aufwand (der gesamten Wegstrecke) zu erreichen.

Beim nearest-neighbour Verfahren wird immer der nächstgelegene Ort angefahren. Die Christofides-Heuristik erzeugt einen minimalen Spannbaum.

(Blaßkiewitz, 2000-2001)

Der Ameisen-Algorithmus bildet aus Erfahrungen den kürzesten Weg von einer Nahrungsquelle zum Nest. Ein langer Pfad wird in derselben Zeit, bei gleicher Geschwindigkeit, weniger oft betreten, als ein kurzer. Die Häufigkeit des betretenden Pfades nimmt mit der Duftstoffkonzentration zu und somit wieder die Häufigkeit des betretenden Pfades. Hieraus bildet sich mit der Zeit der kürzeste Pfad heraus. Dieses Verfahren wird unter anderem im Straßenverkehr eingesetzt.

(Feynman & Leighton, 1985), (Blaßkiewitz, 2000-2001), (Weinard, 2007)

Zur Pfadoptimierung dienen Algorithmen mit verschiedenen Ansätzen. In Abhängigkeit des Anwendungsbereiches werden diese spezifisch eingesetzt.

Der große Nachteil besteht bei diesen Algorithmen in der Abhängigkeit von den Messparametern, beispielsweise Strömungsrichtung, Strömungsgeschwindigkeit, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Wellengang, Beladung, Trimmung, Geschwindigkeit und Rumpfraugigkeit. Diese führen ebenfalls zu einem sehr komplexen Modell, das nur schwer mit ausreichender Genauigkeit zu realisieren ist. Häufig ist ein weiterer Nachteil auch die Zielrichtung und folglich die Geschwindigkeit der Berechnungen. Der Aufwand und die Kosten sind in der Containerschifffahrt aus Bilanzierungsgründen und Quartalszwängen nicht umzusetzen. Das Modell soll möglichst geringen Aufwand mit hoher Genauigkeit vereinbaren. Dies ist insbesondere aus Marktfähigkeit ein entscheidender Vorteil. Ziel ist somit, die optimale energetische Route mit möglichst geringem messtechnischem Aufwand zu finden.

## 9 Messtechnik

Da ein statistischer Ansatz verfolgt wird, der auf stochastischen Prozessen basiert, ist sehr schnell ersichtlich, dass eine ausreichend große Stichprobenmenge vorhanden sein muss, damit eine verlässliche Aussage getroffen werden kann.

Da für die breite Einführung ökonomische Rahmenbedingungen eingehalten werden müssen, ist der Aufwand für Personal und Datenerhebung möglichst gering zu halten.

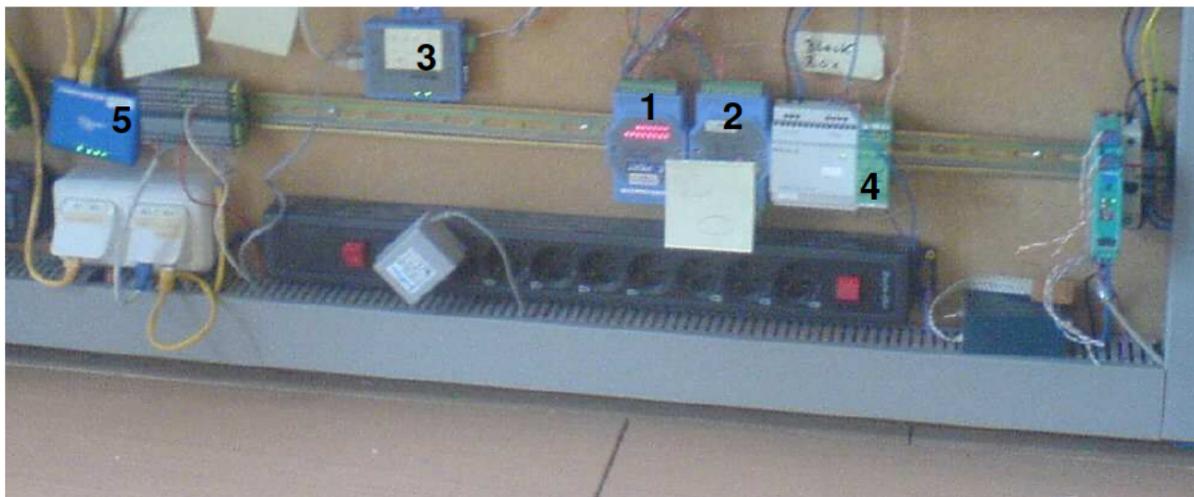
Eine Evaluierung der energetisch optimalen Route anhand des Treibstoffverbrauches nach nur wenigen Fahrten wirft viele Probleme aufgrund der vielen nicht berücksichtigten Parameter auf. Faktoren, die einen signifikanten Einfluss auf den Treibstoffverbrauch haben, sind Seegang, Windrichtung und Windgeschwindigkeit, Strömungsrichtung, Strömungsgeschwindigkeit, Abhängigkeiten dieser Einflüsse von Jahreszeiten, Verwendung von Kühlung und/oder Druckluft, Rumpfbewuchs, Trimmung und Bedienung der Einrichtungen. Diese Größen sind nur mit einem erheblichen messtechnischen Aufwand zu erfassen. Das verwendete Modell hingegen beruht auf Erfahrungswerten. Diese werden aus Messdaten gewonnen, anhand derer Wahrscheinlichkeiten für einen bestimmten, in diesem Fall energetischen Zustand erstellt werden. In diesem Modell fließen diese Größen indirekt, als verborgene Größen des jeweiligen Zustands des energetischen Routenprofiles mit ein.

Die Stichprobenmenge wird aus der Erfassung von Messdaten gewonnen. Im Rahmen eines Pilotprojektes wurde ein Schiff mit den notwendigen Installationen, an denen auch ich mitwirken durfte, zur Erfassung von Verbrauch, Geschwindigkeit, Kurs, Position und Wellenleistung ausgerüstet. Das ausgestattete Schiff gehört zur Super-Panamax-Klasse und hat eine Kapazität von 8.073 TEU und eine Länge von 333 m.

Der zur Aufzeichnung der Messdaten verwendete Datenlogger ist mit einer GPRS-Antenne ausgestattet. Die Erfassung der Messwert-Impulse erfolgt über Analog-/Digitale-Eingangsmodule.

Die Übertragung der Signale zum Datenlogger findet über RS422/ RS485 Konverter statt. Die Übertragung der Daten an Land findet über das GPRS-Netz statt. Die Daten werden im Online-Datenbanken-System Java Envidatec Visualization (JEVis) gespeichert. Die Visualisierung der Messdaten erfolgt mit dem Java Envidatec Graph (JEGraph). Eine Bestimmung der Position des Schiffes auf einer digitalen Karte erfolgt mit dem Java Envidatec Geographic Information System (JEGIS).

Die Kommunikation mit dem Datenlogger findet aufgrund der Funkreichweite nur in küstennahen Gebieten statt. Die Daten werden bei nicht Erreichbarkeit im Datenlogger gespeichert. Zurzeit wird an einer Satellitenkommunikation gearbeitet. Für die Berechnung der Routen ist keine zeitnahe Erfassung erforderlich.



**Abbildung 3: Messtechnik des Containerschiff**

**Nachstellung des Messaufbaus des Containerschiffs zur Simulation der Datenerfassung**

- 1) digital input Modbus module, 2) analog input Modbus module, 3) RS 422/RS 485 Konverter, 4) Impulsdoppler, 5) Ethernet-Switch

## 10 Das Hidden Markov Modell

Die beste Wahl zur Erstellung der energetischen Routenprofile ist das Hidden Markov Modell (HMM), da es den Aufwand an Messtechnik sehr gering hält und das System auf wenige Variablen vereinfacht. Des Weiteren bietet es eine hohe Genauigkeit, eine ausreichende Berechnungsgeschwindigkeit und eine Vereinfachung der Komplexität des Systems.

Anhand von Messdaten mehrerer Schiffe auf einer festgelegten Route wird deren energetisches Routenprofil ermittelt.

Da es um unterschiedliche Besatzungen und Fahrweisen geht, erkennt man anhand der Verbräuche bereits zu diesem Zeitpunkt erhebliche Unterschiede im Treibstoffverbrauch und somit ergeben sich auch unterschiedliche energetische Routenprofile.

Das Modell reduziert die notwendigen Parameter auf die sichtbaren Beobachtungen/Emissionen zur Berechnung der energetischen Zustände. Die „verborgenen“ Einflüsse (nicht gemessene Parameter), werden durch die Wahrscheinlichkeiten des jeweiligen Zustands berücksichtigt. Eine Optimierung der energetisch günstigsten Route findet a posteriori, also anhand von Erfahrungswerten statt. Diese drücken sich in den Wahrscheinlichkeiten der energetischen Zustände der Routen aus.

Die Verbesserung der Genauigkeit durch „Training“, also Konvergenz gegen genauere Werte, erfolgt durch zusätzliche Stichproben und Erwartungswert Maximierung.

Markov nutzte seine Analysen ursprünglich zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit, dass bei Beobachtungen in Abhängigkeit von versteckten Zuständen, ein bestimmtes Ereignis, einer Beobachtung folgte. Heute findet es breite Anwendung, vor allem in der Gensequenzierung und Spracherkennung.

Das Hidden Markov Modell besteht aus 2 verschiedenen stochastischen Prozessen.

Ein unsichtbarer Prozess ist ein Prozess, dessen Ursachen zu komplex sind, um sie abzubilden oder versteckt sind und sich nicht direkt darstellen lassen. Dieser Prozess liegt in Form einer Markovkette vor. Daher stammt der Begriff Hidden Markov.

Ein zweiter sichtbarer Prozess ist ein Prozess, dessen Auswirkungen sich in Beobachtungen (Emissionen) wieder finden und zum Beispiel durch Messdaten dargestellt werden.

Zweck ist es Rückschlüsse der Abhängigkeiten des beobachteten Zufallsereignisses dem sichtbaren Prozess, auf den unsichtbaren Prozess zu ziehen.

Handelt es sich um eine endliche Menge an Zuständen, spricht man von einem diskreten HMM (begrenzte Sequenzlänge) im Gegensatz zu einem kontinuierlichen HMM, bei dem es eine stetige Verteilung gibt.

Das HMM geht von zwei Annahmen aus. Die erste Annahme ist die Unabhängigkeit der Zustände und besagt, dass der Ausgang der Beobachtung zum Zeitpunkt  $t$  nur abhängt vom gegenwärtigen Zustand. Die zweite Annahme geht davon aus, dass der aktuelle Zustand unabhängig ist vom vorhergehenden Zustand.

Hierbei ist zwischen Arc-Emission Modell und State-Emission Modell zu unterscheiden. Das Arc-Emission Modell erkennt die Abhängigkeit einer Beobachtung vom Zustand zum Zeitpunkt  $t$  und  $t+1$ . Das State-Emission Modell geht von der Annahme aus, dass die Beobachtung zum Zeitpunkt  $t$  nur vom Zustand zum Zeitpunkt  $t$  abhängt.

Das HMM ist ergodisch, wenn jeder Zustand von allen Zuständen aus erreicht werden kann.

Ein HMM ist nicht ergodisch, wenn von einem Zustand nicht alle anderen Zustände erreicht werden können.

(Haenelt, 06/2007), (R.Rabiner, 1989), (Mohr, 2008), (Waldmann & Stocker, 2004), (Pahlke, 2011)

## 10.1 Grundlegende Definitionen eines Hidden Markov Models

Das Hidden Markov Modell ist ein 5-Tupel  $\lambda = (\mathbf{A}, \mathbf{B}, \pi, \mathbf{S}, \mathbf{V})$ .

S sind die möglichen Zustände, die vom Begriff states herrühren.

$$\mathbf{S} = (s_1, \dots, s_N)$$

V (visualizations) sind die möglichen Beobachtungs-/Emissionssymbole.

$$\mathbf{V} = (v_1, \dots, v_M)$$

Q ist eine Folge von Zustandswerten aus S, mit der Anzahl T.

$$\mathbf{Q} = (q_1, \dots, q_T)$$

O ist eine zu Q gehörende Folge von Beobachtungen/Emissionen aus V, O von observations, mit der Anzahl T.

$$\mathbf{O} = (o_1, \dots, o_T)$$

T ist die Länge der Beobachtungssequenz (Anzahl der Beobachtungen).

N ist die Anzahl der möglichen Zustände.

M ist die Anzahl der möglichen Beobachtungs-/Emissionssymbole.

A ist die Übergangsmatrix, die die Wahrscheinlichkeiten enthält, dass dem Zustand i der Zustand j folgt.

$$\mathbf{A} = [a_{ij}]$$

A enthält die Einzelwahrscheinlichkeiten  $a_{ij}$ .

$$a_{ij} = P(q_t = s_j | q_{t-1} = s_i)$$

B ist die Emissionsmatrix, die die Wahrscheinlichkeiten enthält, dass die Beobachtung k aus dem Zustand j von t abhängt.

$$\mathbf{B} = [b_j(\mathbf{k})], b_j(\mathbf{k}) = P(o_t = v_k | q_t = s_j), 1 \leq j \leq N, 1 \leq k \leq M$$

Die Initiale Zustandsdichte  $\pi$ , ist der Vektor der Einzelwahrscheinlichkeiten der Startzustände  $\pi_i$ , in Abhängigkeit der möglichen Zustandswerte.

$$\pi_i = P(\mathbf{q}_1 = s_i), 1 \leq i \leq N$$

(R.Rabiner, 1989)

Bedingung, dass der aktuelle Zustand nur vom vorhergehenden Zustand abhängt

$$P(\mathbf{q}_t | \mathbf{p}_1^{t-1}) = P(\mathbf{q}_t | \mathbf{q}_{t-1})$$

(R.Rabiner, 1989)

Beobachtung hängt nur vom aktuellen Zustand ab

$$P(\mathbf{o}_t | \mathbf{o}_1^{t-1}, \mathbf{p}_1^t) = P(\mathbf{o}_t | \mathbf{q}_t)$$

(R.Rabiner, 1989)

## 10.2 Beispiel eines Hidden Markov Models

Die Übergangsmatrix der Zustände  $A$ , mit 3 Zuständen und den Wahrscheinlichkeiten  $a_{ij}$  ist folglich eine  $3 \times 3$  Matrix, da  $N^2$  Zustandsübergänge der Zustände auftreten können.

$$A = \begin{matrix} & \mathbf{a}_{11} & \mathbf{a}_{12} & \mathbf{a}_{13} \\ \mathbf{a}_{21} & & & \\ \mathbf{a}_{31} & & & \end{matrix} \begin{matrix} \mathbf{a}_{22} & \mathbf{a}_{23} \\ \mathbf{a}_{32} & \mathbf{a}_{33} \end{matrix}$$

Die Initialisierung erfolgt durch die Wahrscheinlichkeiten der energetischen Startzustände  $\pi_i$ .

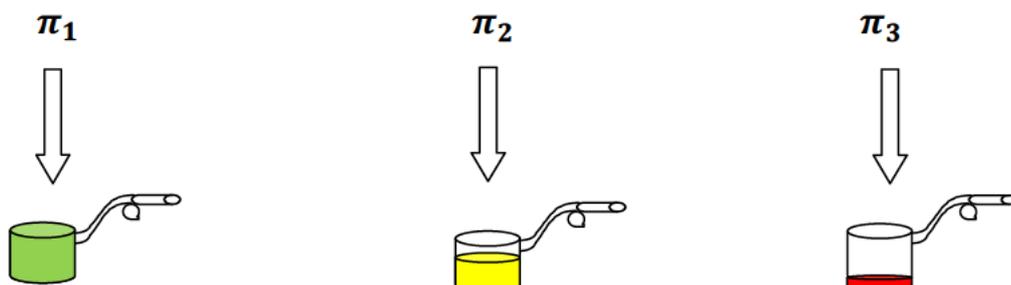


Abbildung 4: Energetische Startzustände

Die Berechnung des Modells beginnt mit den Startwahrscheinlichkeiten der einzelnen Zustände  $\pi_i$

Nach Initialisierung erfolgt der Übergang eines Zustands zu den anderen oder selben Zuständen mit der Wahrscheinlichkeit  $a_{ij}$ .

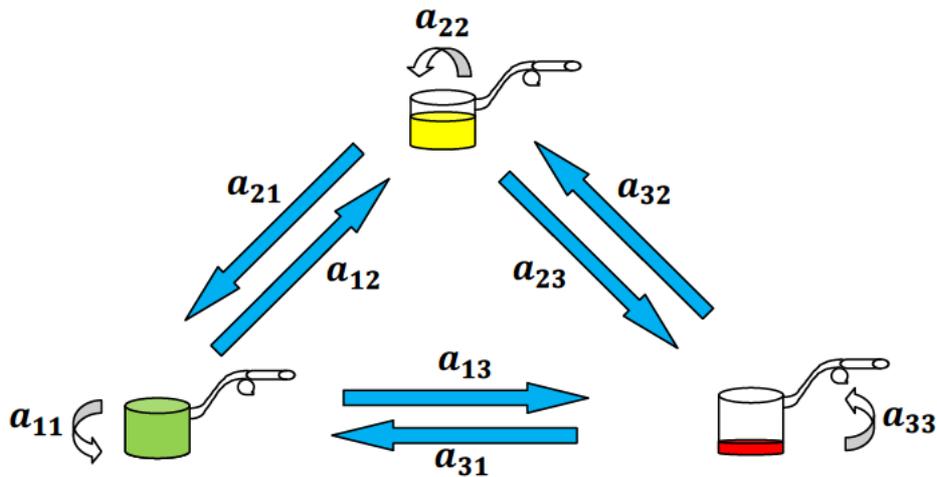


Abbildung 5: Zustandsübergänge

Der Übergang der einzelnen Zustände erfolgt mit der Wahrscheinlichkeit  $a_{ij}$

Die Emissionsmatrix enthält die Wahrscheinlichkeiten, dass die Beobachtung/Emission aus dem Zustand  $j$  von  $t$  abhängt, ist bei 4 unterschiedlichen Beobachtungen/Emissionen folglich eine  $3 \times 4$  Matrix,  $N \times M$  oder auch  $N$  Zeilen mit  $M$  Spalten.

$$B = \begin{matrix} \mathbf{b}_{11} & \mathbf{b}_{12} & \mathbf{b}_{13} & \mathbf{b}_{14} \\ \mathbf{b}_{21} & \mathbf{b}_{22} & \mathbf{b}_{23} & \mathbf{b}_{24} \\ \mathbf{b}_{31} & \mathbf{b}_{32} & \mathbf{b}_{33} & \mathbf{b}_{34} \end{matrix}$$

Übertragen ins Beispiel bedeutet das, dass die Beobachtung/Emission, der gemessene Treibstoffverbrauch ist. Der energetische Zustand ist der Zustand im Routenprofil.

Der verborgene energetische Zustand der Route  $a_{ij}$  emittiert mit der Wahrscheinlichkeit  $b_{ij}$  die gemessene Beobachtung/Emission  $v_k$  Treibstoffverbrauch.

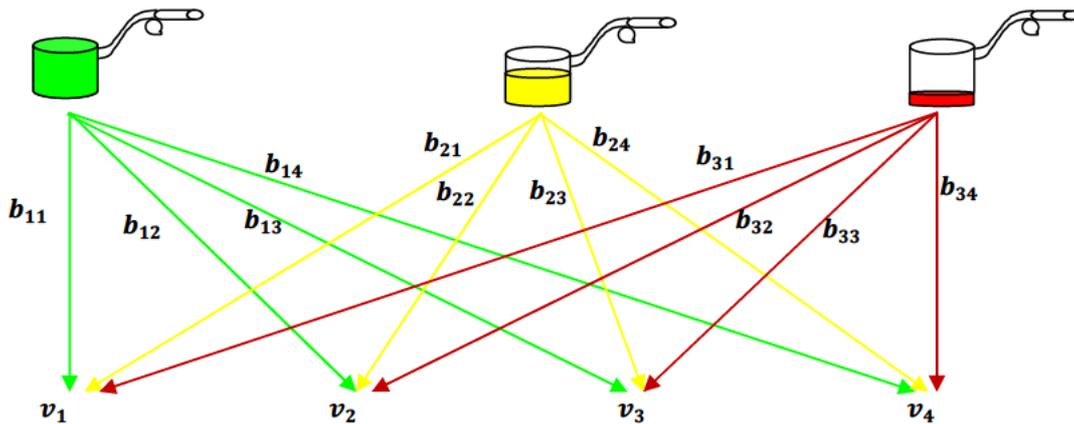


Abbildung 6: Emission der Beobachtungen aus den energetischen Zuständen  
 Die Emissionen der Beobachtungen  $v_k$  erfolgt mit der Wahrscheinlichkeit  $b_{ij}$  aus  $a_{ij}$ .

Zusammengefügt zu einem Gesamtmodell ergibt sich:

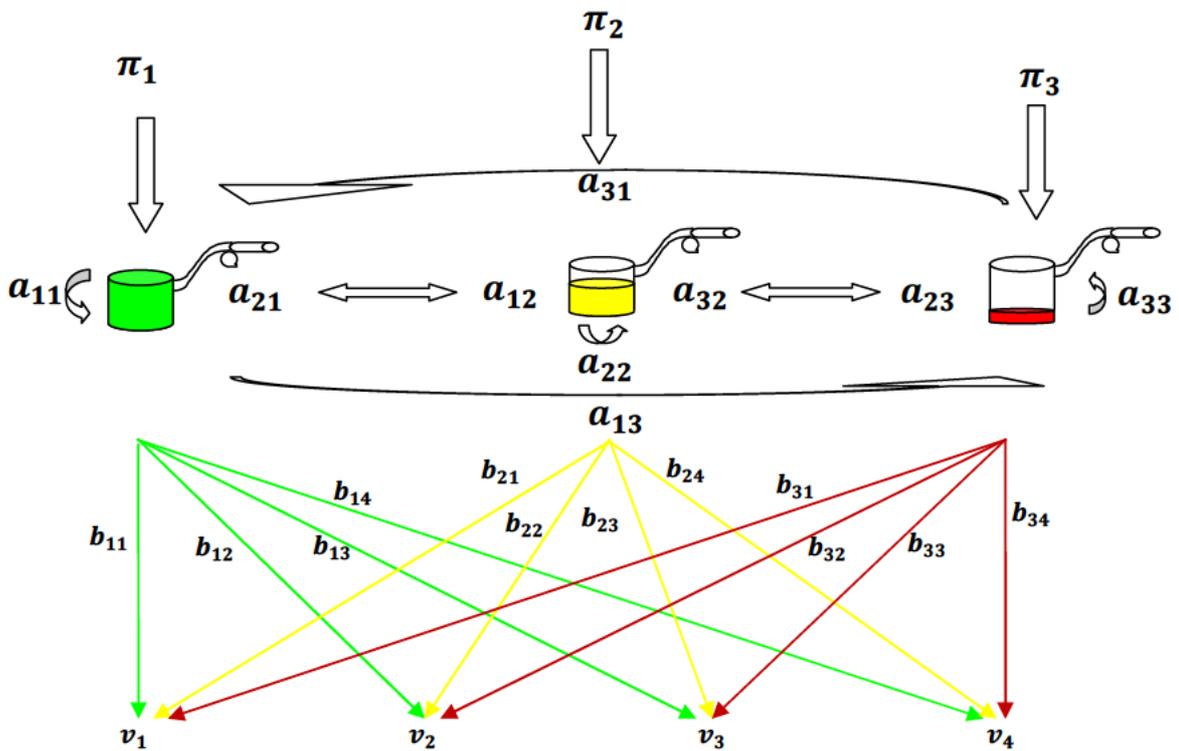
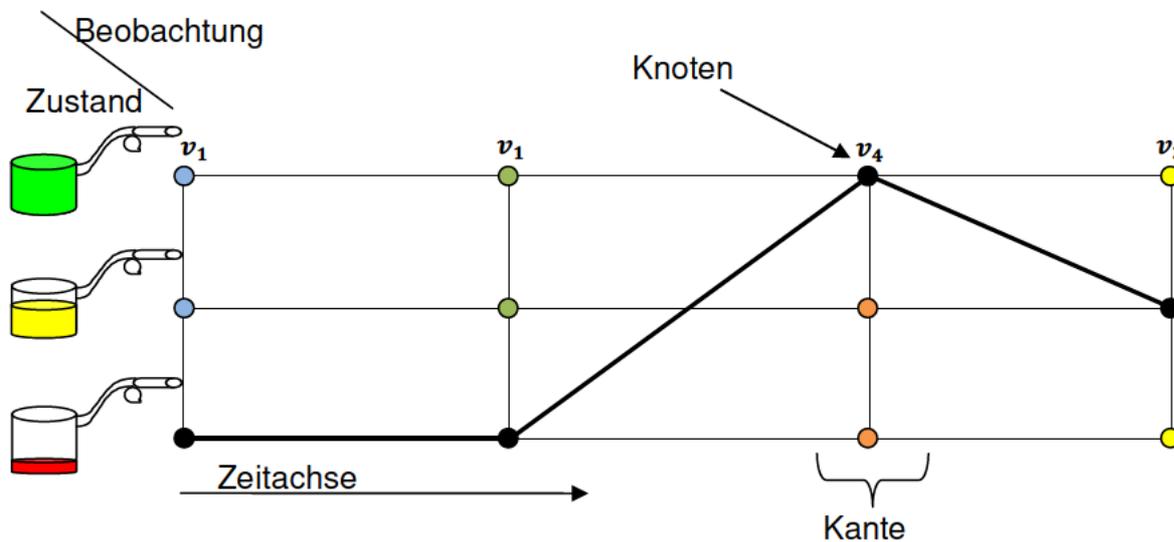


Abbildung 7: Verknüpfung von Übergängen und Emissionen

Die Berechnung des Modells beginnt mit den Startwahrscheinlichkeiten der einzelnen Zustände  $\pi_i$ . Der Übergang der einzelnen Zustände erfolgt mit der Wahrscheinlichkeit  $a_{ij}$ . Die Emissionen der Beobachtungen  $v_k$  erfolgt mit der Wahrscheinlichkeit  $b_{ij}$  aus  $a_{ij}$ .

Da bei der vorhergehenden Darstellung der zeitliche Zusammenhang nicht ersichtlich wird, werden Beobachtungen und Zustände in ein Trellis-Diagramm übertragen. Die Zustandsübergänge der Übergang eines Punkts von links nach rechts werden hierbei als Kante bezeichnet.



**Abbildung 8: Zustandsübergänge und Emissionen im Trellis-Diagramm**

Zeitlicher Zusammenhang von Wahrscheinlichkeiten der Zustandsübergänge und emittierten Emissionen, sowie deren Pfadwahrscheinlichkeiten

Jeder Punkt heißt Knoten und ist die aktuelle Wahrscheinlichkeit der Zustandsfolge  $Q$  und der emittierten Beobachtungsfolge  $O$ . Die hervorgehobene schwarze Linie markiert den wahrscheinlichsten Pfad.

(Haenelt, 06/2007), (R.Rabiner, 1989), (Waldmann & Stocker, 2004), (McCallum, 03/2004), (Blunsom, 08/2004)

Die Wahrscheinlichkeit eines Pfades lässt sich Berechnen durch:

$$P(O|Q, \lambda) = \prod_{t=1}^T P(o_t|q_t, \lambda) = b_{q_1}(o_1) * \dots * b_{q_T}(o_T)$$

$$P(Q|\lambda) = \pi_{q_1} * a_{q_1q_2} * a_{q_2q_3} * \dots * a_{q_{T-1}q_T}$$

$$P(O|\lambda) = \sum_Q P(O|Q, \lambda) * P(Q|\lambda) = \sum_{q_1, \dots, q_T} \pi_{q_1} * b_{q_1}(o_1) * a_{q_1q_2} * b_{q_2}(o_2) * \dots * a_{q_{T-1}q_T} * b_{q_T}(o_T)$$

**Formel 6: Evaluierung eines Hidden Markov Models**

(R.Rabiner, 1989)

### 10.3 Auswertung des Hidden Markov Models

Zunächst haben wir für das Hidden Markov Model fünf energetische Zustände definiert: Sehr Günstig  $a_{1j}$ , Günstig  $a_{2j}$ , Durchschnittlich  $a_{3j}$ , Ungünstig  $a_{4j}$  und Sehr Ungünstig  $a_{5j}$ . Des Weiteren haben wir fünf Beobachtungen des Treibstoffverbrauches Sehr Gering  $b_{j1}$ , Gering  $b_{j2}$ , Durchschnittlich  $b_{j3}$ , Hoch  $b_{j4}$  und Sehr Hoch  $b_{j5}$  definiert.

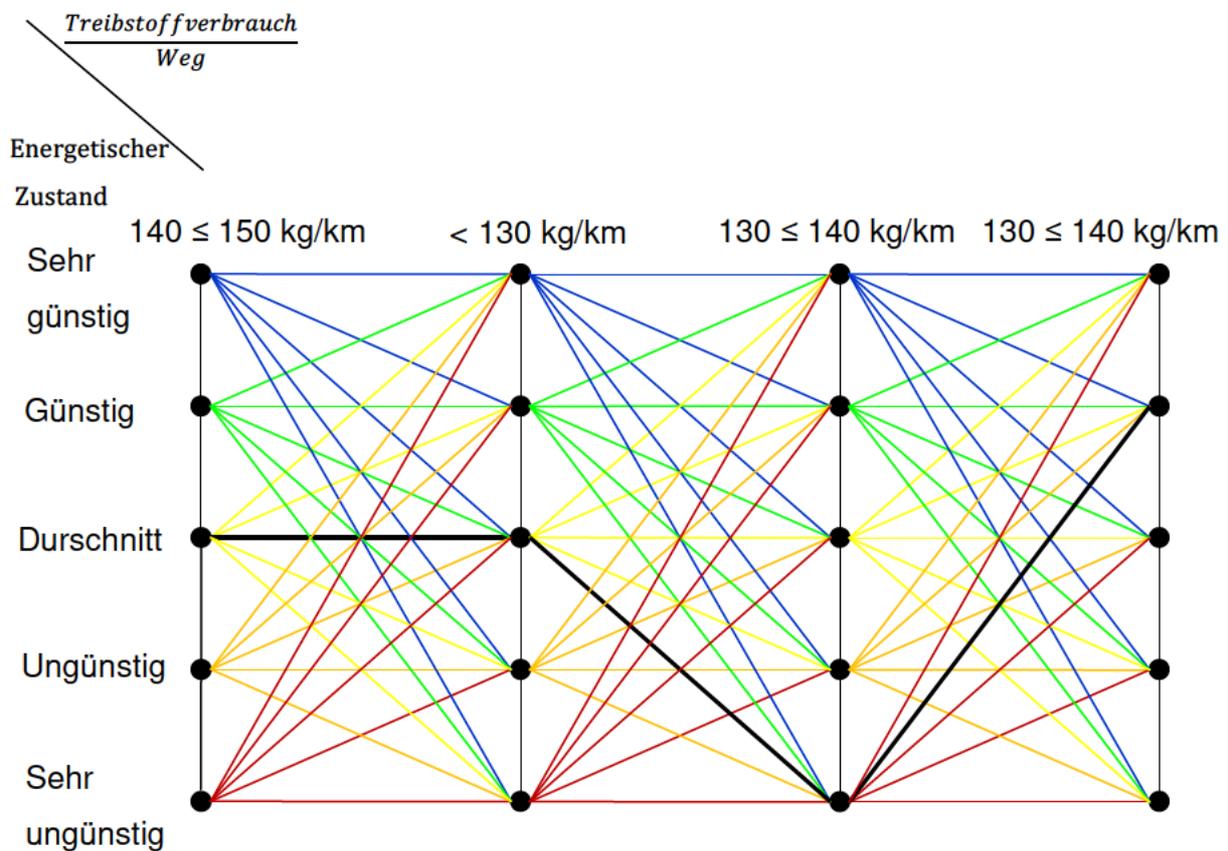


Abbildung 9: Wahrscheinlichster Pfad des Brute-Force-Algorithmus

Berechnung des wahrscheinlichsten Pfades mit dem Brute-Force-Algorithmus im Trellis-Diagramm

Der Aufwand zur Berechnung des wahrscheinlichsten Zustands-Pfades einer gegebenen Beobachtungsfolge, aus der Ermittlung aller Pfade (s.a. Abbildung 9: Wahrscheinlichster Pfad des Brute-Force-Algorithmus, S. 30) ist ineffizient, daher wird eine effizientere Methode verwendet.

## 10.4 Der Viterbi-Algorithmus

Der Viterbi-Algorithmus ist die effizienteste Methode, die wahrscheinlichste Zustandsabfolge zu einer gegebenen Beobachtungsfolge zu finden. Hieraus erschließt sich, ob eine Route energetisch günstig ist oder nicht. Bei jedem Schritt wird nur das Maximum der Pfadwahrscheinlichkeit zur weiteren Berechnung herangezogen.

Zunächst wird das Maximum der Wahrscheinlichkeit einer Kante  $\delta_t(i)$  definiert

$$\delta_t(i) = \max_{q_1, \dots, q_{t-1}} P(q_1, \dots, q_t = s_i, o_1, \dots, o_t | \lambda)$$

**Formel 7: Maximale Wahrscheinlichkeit einzelner Pfad eines HMM**

(R.Rabiner, 1989)

Daraus erhält man durch Induktion

$$\delta_{t+1}(j) = [\max_i \delta_t(i) a_{ij}] * b_j(o_{t+1})$$

**Formel 8: Induktion Viterbi-Algorithmus**

(R.Rabiner, 1989)

Für den nächsten Knoten wird das Argument des Zustands  $j$  zum Zeitpunkt  $t$  des wahrscheinlichsten Knotens, in der Folge  $\Psi_t(j)$  gespeichert.

Initialisierung

$$\delta_1(i) = P(\pi_i * b_i(o_1)), 1 \leq i \leq N,$$

$$\Psi_1(i) = 0$$

**Formel 9: Initialisierung Viterbi-Algorithmus**

(R.Rabiner, 1989)

Rekursion

$$\delta_t(j) = \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_{t-1}(i) a_{ij}] * b_j(o_t), 2 \leq t \leq T, 1 \leq j \leq N$$

$$\Psi_t(j) = \arg \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_{t-1}(i) a_{ij}], 2 \leq t \leq T, 1 \leq j \leq N$$

**Formel 10: Rekursion Viterbi-Algorithmus**

(R.Rabiner, 1989)

Terminierung

$$P^* = \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_T(i)]$$

$$q_t^* = \arg \max_{1 \leq i \leq N} [\delta_T(i)]$$

Formel 11: Terminierung Viterbi-Algorithmus

(R.Rabiner, 1989)

Zurückverfolgung der Zustandssequenz

$$q_t^* = \Psi_{t+1}(q_{t+1}^*), t = T-1, T-2, \dots, 1$$

Formel 12: Backtracking Viterbi-Algorithmus

(R.Rabiner, 1989)

Bei der Beispiel Berechnung des wahrscheinlichsten Pfades mit dem Viterbi-Algorithmus (s.a. Abbildung 10: Beispiel eines Pfades berechnet mit dem Viterbi-Algorithmus, S. 32) werden für die erste Kante die Wahrscheinlichkeiten gebildet,  $\delta_1 = P(\pi_1^* | b_1(o_1))$ . Hier wird das Maximum gesucht und der Zustand in der Variablen in diesem Beispiel  $\Psi_2(i) = 3$  gespeichert.

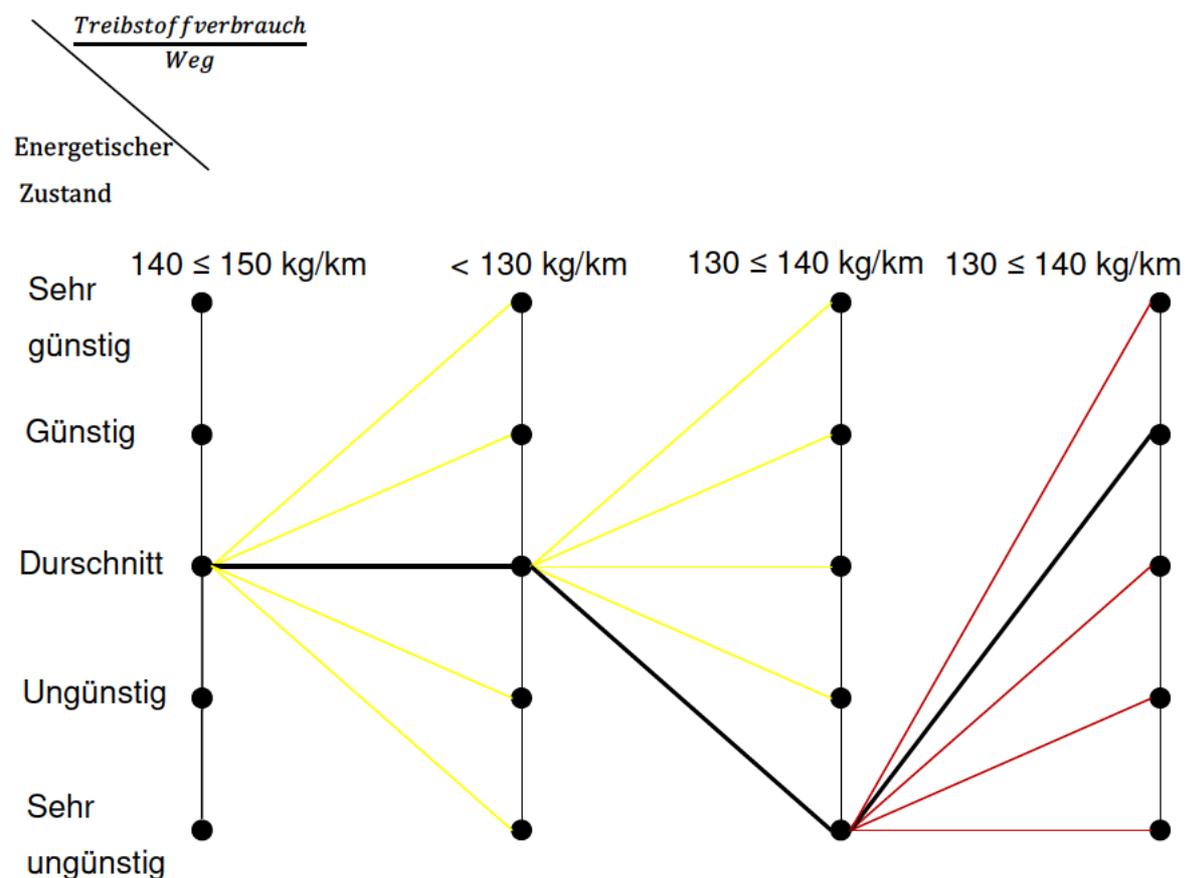


Abbildung 10: Beispiel eines Pfades berechnet mit dem Viterbi-Algorithmus

Effiziente Berechnung des wahrscheinlichsten Pfades mit dem Viterbi-Algorithmus im Trellis-Diagramm

1.  $\delta_1 = \max \pi_i * b_{i3}, \Psi_2(i) = 3$
2.  $\delta_2 = \max [\delta_1(i) a_{ij}] * b_j(o_t) = [\delta_1(i) * a_{33}] * b_{31}, \Psi_3(j) = \arg \max [\delta_2 * a_{33}] = 3$
3.  $\delta_3 = \max [\delta_2(i) a_{ij}] * b_j(o_t) = [\delta_2(i) * a_{35}] * b_{52}, \Psi_4(i) = \arg \max [\delta_3 * a_{35}] = 5$
4.  $\delta_4 = \max [\delta_3(i) a_{ij}] * b_j(o_t) = [\delta_3(i) * a_{52}] * b_{22}, \Psi_5(i) = \arg \max [\delta_4 * a_{52}] = 2$

Da Zustand 3 die maximale Wahrscheinlichkeit der Kante aufweist, gehen wir von hier aus weiter zu allen Zuständen der nächsten Kante. Hier wird wieder das Maximum bestimmt. Dieses Verfahren verfolgen wir bis zum letzten Knoten.

(R.Rabiner, 1989), (Blunsom, 08/2004), (Haenelt, 06/2007), (Stamp, 01/2012), (Yigitbas, 4/2010)

#### 10.4.1 Underflow der Pfadwahrscheinlichkeiten

Bei langen Pfaden werden die Pfadwahrscheinlichkeiten immer kleiner. Zur Vermeidung von System-Untergrenzen können beim Viterbi-Algorithmus die Wahrscheinlichkeiten logarithmiert und addiert werden. Anstelle davon wird die Normierung über die Kantenwahrscheinlichkeit verwendet.

(Haenelt, 06/2007), (R.Rabiner, 1989), (Blunsom, 08/2004)

Der Quellcode zum Viterbi-Algorithmus befindet sich im Anhang der Abschlussarbeit. Das Backtracking zur Bestimmung des Pfades, wird durch die Speicherung des Pfades in einem Array beim Durchlauf des Algorithmus realisiert und entfällt.

#### 10.5 Der Baum-Welch-Algorithmus

Zur Analyse der Routenprofile werden die Wahrscheinlichkeiten der Beobachtungen, der Zustandsübergänge und der Startwahrscheinlichkeiten benötigt.

Diese werden durch den Baum-Welch-Algorithmus aus den Beobachtungen bestimmt. Der Baum-Welch-Algorithmus ist eine iterative Methode um  $P(O|Q, \lambda)$  (s.a. Formel 6: Evaluierung eines Hidden Markov Models, S. 29) lokal zu maximieren.

Die Wahrscheinlichkeit zum Zeitpunkt  $t$  im Zustand  $s_i$  zu sein ist definiert als

$$\delta_t(\mathbf{i}) = P(\mathbf{q}_t = s_i | \mathbf{O}, \lambda)$$

**Formel 13: Definition der Wahrscheinlichkeit des Zustands  $s(i)$  zum Zeitpunkt  $t$**

(R.Rabiner, 1989), (Moss, 2008)

Der Erwartungswert wird mit jedem kompletten Durchlauf der Berechnungsschritte maximiert und konvergiert zu bestimmten Wahrscheinlichkeitswerten.

Der Baum-Welch-Algorithmus ist der wichtigste und komplizierteste Schritt, da hier die Rahmenbedingungen des Modells festgelegt werden.

Der Berechnungsaufwand für einen Durchlauf des Baum-Welch-Algorithmus ist für  $\delta = O^*(N^2T)$ . Für die verbesserten Parameter ist der Berechnungsaufwand  $O(NKT)$ ,  $O(N)$  und  $O(N^2T)$ .

(Carstensen, Ebert, & Ebert, 11/2009)

Die Definition der Wahrscheinlichkeit das der Zustand  $s_i$  zum Zeitpunkt  $t$  ist und zum Zeitpunkt  $t+1$  in den Zustand  $s_j$  übergeht ist

$$\gamma_t(i, j) = P(q_t = s_i, q_{t+1} = s_j | \mathbf{O}, \lambda)$$

**Formel 14: Zustandsübergangswahrscheinlichkeit Baum-Welch-Algorithmus**

(R.Rabiner, 1989), (Moss, 2008), (Stamp, 01/2012), (Moss, 2008)

### 10.5.1 Forward-Algorithmus

Mit dem Forward-Algorithmus wird die Wahrscheinlichkeit einer Beobachtungsfolge  $P(\mathbf{O} | \lambda)$  bestimmt.

Des Weiteren wird die Wahrscheinlichkeit eines Zustandes  $i$  zum Zeitpunkt  $t$  einer gegebenen Beobachtungsfolge bestimmt.

$$\alpha_t(i) = P(o_1, \dots, o_t, q_T = s_i | \lambda)$$

**Formel 15: Zustandswahrscheinlichkeit Forward-Algorithmus**

(R.Rabiner, 1989)

Startzustand

$$\alpha_1(i) = \pi_i * b_i(o_1), 1 \leq i \leq N$$

**Formel 16: Wahrscheinlichkeit des Startzustands Forward-Algorithmus**

(R.Rabiner, 1989)

Induktion

$$\alpha_{t+1}(j) = [\sum_{i=1}^N \alpha_t(i) * a_{ij}] * b_j(o_{t+1}), 1 \leq t \leq T-1, 1 \leq j \leq N$$

Formel 17: Induktion Forward-Algorithmus

(R.Rabiner, 1989)

Terminierung

$$P(O|\lambda) = \sum_{i=1}^N \alpha_T(i)$$

Formel 18: Terminierung Forward-Algorithmus

(R.Rabiner, 1989)

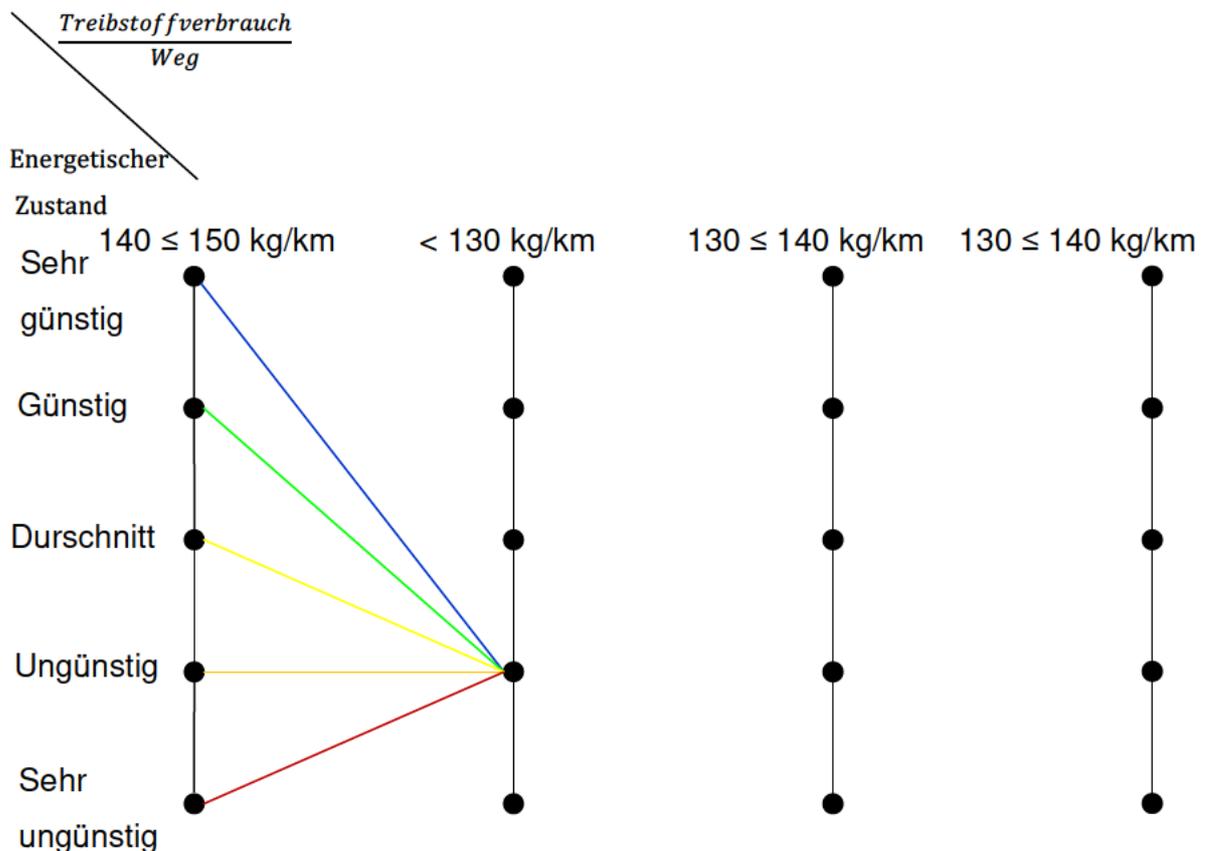


Abbildung 11: Beispiel Berechnung eines Knotens mit dem Forward-Algorithmus

Berechnung eines Knotens mit dem Forward-Algorithmus zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit einer Beobachtungsfolge  $P(O|\lambda)$  des Hidden Markov Models

Beispiel Berechnung eines Knotens mit dem Forward-Algorithmus (s.a. Abbildung 11: Beispiel Berechnung eines Knotens mit dem Forward-Algorithmus, S. 35).

$$\alpha(O,2,4) = (\alpha(O,1,1) * a_{14} + \alpha(O,1,2) * a_{24} + \alpha(O,1,3) a_{34} + \alpha(O,1,4) * a_{44} + \alpha(O,1,5) * a_{54}) * b_{41}$$

Die Berechnungen zu allen anderen Knoten erfolgt analog, die letzte Kante wird aufsummiert und gibt die Wahrscheinlichkeit der Beobachtungsfolge  $P(O|\lambda)$  wieder.

(R.Rabiner, 1989), (Moss, 2008), (Stamp, 01/2012)

## 10.5.2 Backward-Algorithmus

Der Backward-Algorithmus gibt die bedingte Wahrscheinlichkeit der Beobachtungen/ Emissionen aus den energetischen Zuständen wieder.

$$\beta_t(i) = P(o_{t+1}, \dots, o_T | q_t = s_i, \lambda)$$

Formel 19: Bedingte Wahrscheinlichkeit der Beobachtung aus dem Zustand

(R.Rabiner, 1989)

Initialisierung

$$\beta_T(i) = 1, 1 \leq i \leq N$$

Formel 20: Initialisierung Backward-Algorithmus

(R.Rabiner, 1989)

Induktion

$$\beta_t(i) = \sum_{j=1}^N a_{ij} * b_j(o_{t+1}) * \beta_{t+1}(j), t = T-1, \dots, 1, 1 \leq i \leq N$$

Formel 21: Induktion Backward-Algorithmus

(R.Rabiner, 1989)

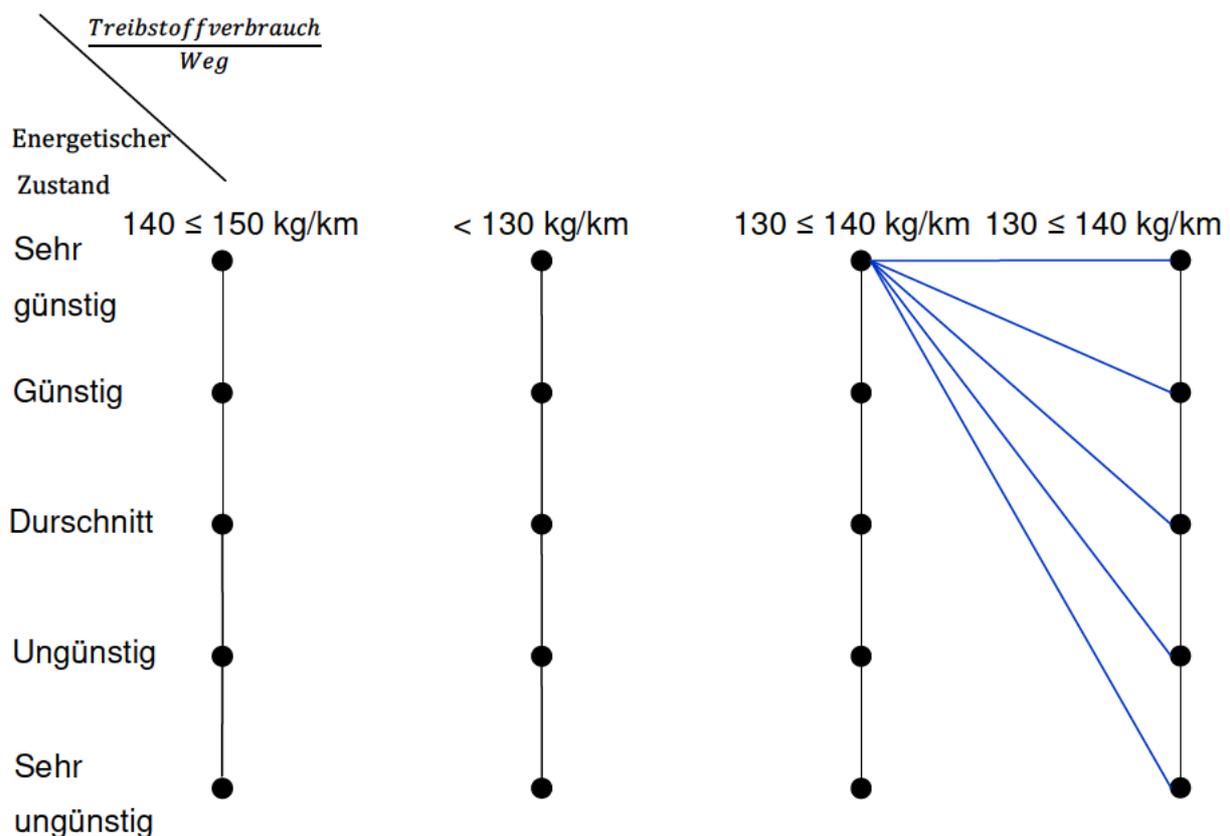


Abbildung 12: Beispiel Berechnung eines Knotens mit dem Backward-Algorithmus

Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeit der Beobachtungen/Emissionen aus den energetischen Zuständen.

Beispiel Berechnung eines Knotens mit dem Backward-Algorithmus (s.a. Abbildung 12: Beispiel Berechnung eines Knotens mit dem Backward-Algorithmus, S. 36).

$$P(O,3, 1) = a_{11} * b_{12} \beta(1)_4 + a_{12} * b_{22} \beta(2)_4 + a_{13} * b_{32} * \beta(3)_4 + a_{14} * b_{42} * \beta(4)_4 + a_{15} b_{52} * \beta(5)_4$$

Die Berechnungen zu allen weiteren Knoten der Kante erfolgen analog. Das Ergebnis ist die bedingte Wahrscheinlichkeit der Beobachtungen/Emissionen aus den energetischen Zuständen.

(R.Rabiner, 1989), (Moss, 2008), (Stamp, 01/2012)

### 10.5.3 Kombination Forward-Backward-Algorithmus

Zur Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten einer Folge Q energetischer Zustände wird  $\gamma_t(i,j)$  bestimmt, der Wahrscheinlichkeit, dass dem energetischen Zustand zum Zeitpunkt j, der energetische Zustand zum Zeitpunkt j+1 folgt.

(Moss, 2008), (R.Rabiner, 1989)

Nach der Definition der Forward-/Backward Algorithmen wird  $\gamma_t(i,j)$  überführt in

$$\gamma_t(i,j) = \frac{a_t(i) * a_{ij} * b_j(o_{t+1}) * \beta_{t+1}(j)}{P(O|\lambda)} = \frac{a_t(i) * a_{ij} * b_j(o_{t+1}) * \beta_{t+1}(j)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_t(i) * a_{ij} * b_j(o_{t+1}) * \beta_{t+1}(j)}$$

#### Formel 22: Kombination Forward-/Backward-Algorithmus

(R.Rabiner, 1989)

Die Wahrscheinlichkeit zu welchem Zeitpunkt auf einer Route, welcher energetische Zustand auftritt, wird bestimmt durch  $\delta_t(j)$ , der Aufsummierung von  $\gamma_t(i, j)$  über t.

(R.Rabiner, 1989), (Moss, 2008)

$$\delta_t(j) = \sum_{i=1}^N \gamma_t(i, j), t < T$$

$$\delta_t(j) = \frac{\alpha_T(j)}{P(O|\lambda)}, t = T$$

#### Formel 23: Terminierung Forward-Backward-Algorithmus

(R.Rabiner, 1989), (Moss, 2008)

In der nachfolgenden Abbildung (s.a. Abbildung 13: Beispiel Berechnung mit dem Forward-Backward-Algorithmus, S. 38) wird anschaulich dargestellt, welche Knoten zur Berechnung der Zustandsübergangswahrscheinlichkeit herangezogen werden.

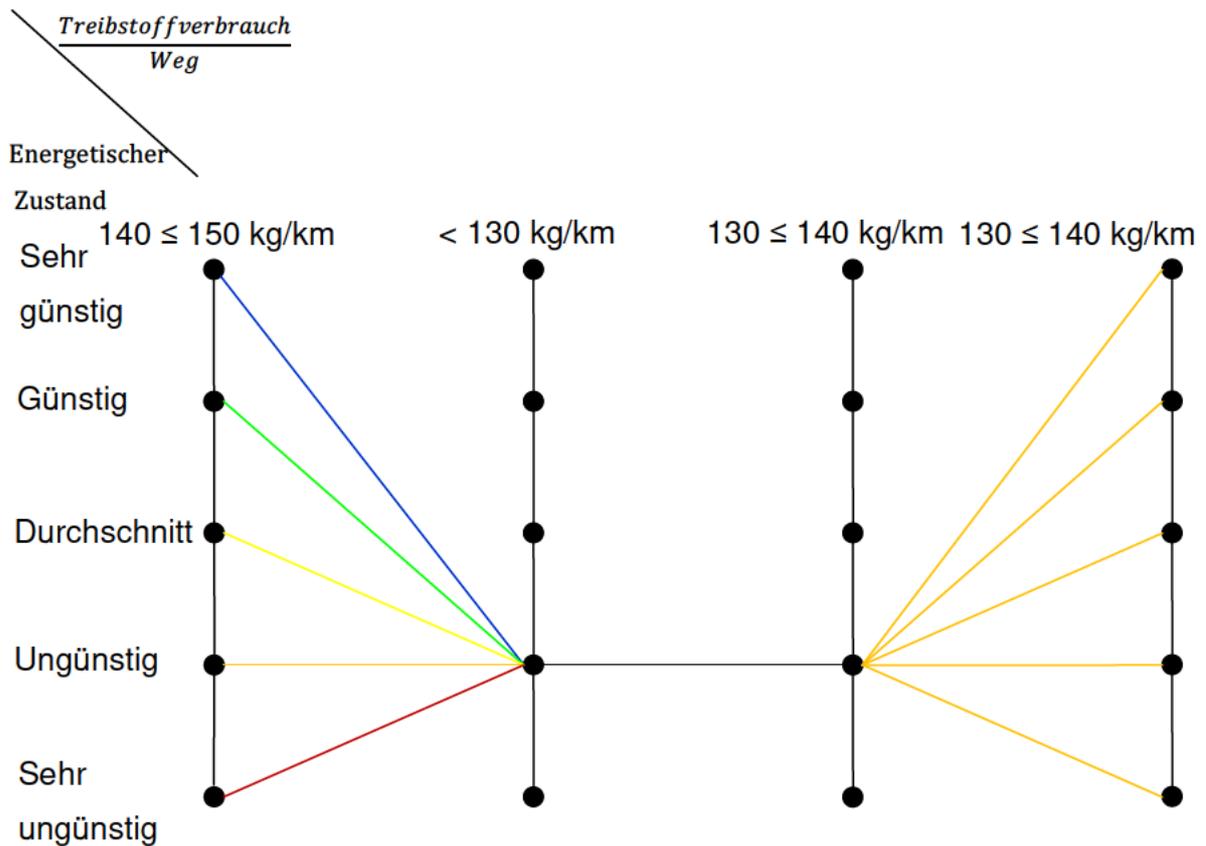


Abbildung 13: Beispiel Berechnung mit dem Forward-Backward-Algorithmus

Berechnung der Wahrscheinlichkeit das der energetische Zustand  $s_i$  zum Zeitpunkt  $t$  auftritt und der folgende Zustand  $s_j$  zum Zeitpunkt  $t+1$

Die Abbildung verdeutlicht, dass die Kombination aus der Wahrscheinlichkeit eines Zustandes  $i$  zum Zeitpunkt  $t$  einer gegebenen Beobachtungsfolge mit der bedingten Wahrscheinlichkeit der Beobachtungen/Emissionen, aus den energetischen Zuständen kombiniert wird. Das gibt die Wahrscheinlichkeit wieder, dass der energetische Zustand  $s_i$  zum Zeitpunkt  $t$  auftritt und der energetische Zustand  $s_j$  zum Zeitpunkt  $t+1$  der folgende ist.

Die neuen Wahrscheinlichkeiten werden durch Zählen der Zustände und Beobachtungen gewonnen.

$\sum_{i=1}^{T-1} \delta_t(i) =$  erwartete Anzahl der Übergänge nach  $s_i$

Formel 24: Erwartete Anzahl der Übergänge nach  $s_i$

(R.Rabiner, 1989), (Moss, 2008)

$\sum_{i=1}^{T-1} \gamma_t(\mathbf{i}, \mathbf{j})$  = erwartete Anzahl der Übergänge von  $s_i$  nach  $s_j$

**Formel 25: Erwartete Anzahl der Übergänge von  $s_i$  nach  $s_j$**

(R.Rabiner, 1989), (Moss, 2008)

Die neue Startwahrscheinlichkeit ist die erwartete Anzahl in Zustand  $s_i$  zum Zeitpunkt  $t = 1$ .

$$\pi_i^*(\mathbf{i}) = \delta_1(\mathbf{i})$$

**Formel 26: Berechnung der neuen Startwahrscheinlichkeiten  $\pi_i^*$**

(R.Rabiner, 1989), (Moss, 2008)

Die neuen Übergangswahrscheinlichkeit ist die erwartete Anzahl der Zustandsübergänge  $s_i$  nach  $s_j$ , geteilt durch die Gesamtzahl der Übergänge von Zustand  $s_i$ .

$$a_{ij}^*(\mathbf{i}) = \frac{\sum_{i=1}^{T-1} \gamma_t(\mathbf{i}, \mathbf{j})}{\sum_{t=1}^{T-1} \delta_t(\mathbf{i})}$$

**Formel 27: Bildung neuer Wahrscheinlichkeiten der Zustandsübergänge  $a_{ij}^*$**

(R.Rabiner, 1989), (Moss, 2008)

Die neue Beobachtungswahrscheinlichkeit ist die erwartete Anzahl der Beobachtungen  $v_k$  in Zustand  $j$ , geteilt durch die erwartete Anzahl in Zustand  $j$ .

$$b_j^*(\mathbf{k}) = \frac{\sum_{s.t. o_t=v_k} \sum_{t=1}^T \delta_t(\mathbf{j})}{\sum_{i=1}^T \delta_t(\mathbf{j})}$$

**Formel 28: Bildung neuer Beobachtungswahrscheinlichkeiten  $b_j(\mathbf{k})^*$**

(R.Rabiner, 1989), (Moss, 2008)

Die vorgestellten Algorithmen sind die Lösungen der 3 Probleme bei der Umsetzung eines Hidden Markov Models.

1. Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer Beobachtungsfolge
2. Effiziente Berechnung der wahrscheinlichsten Pfadesequenz
3. Abschätzen der Modellparameter

(R.Rabiner, 1989), (Wunsch, 08/2001), (Moss, 2008), (Höbel, 11/2010), (McCallum, 03/2004), (Stamp, 01/2012), (Blunsom, 08/2004), (Waldmann & Stocker, 2004), (Haenelt, 06/2007), (Mohr, 2008), (Yigitbas, 4/2010)

## 11 Umsetzung mit Matlab und Octave

Matlab wurde ursprünglich entwickelt um effizient das berechnen mit und von Matrizen zu vereinfachen. Da das Hidden Markov Modell aus Berechnungen von Matrizen und Vektoren verschiedener Größe besteht, sind alle notwendigen vereinfachenden Funktionen, wie suchen eines Maximums oder Zeilenanzahl und Spaltenanzahl einer Matrix und eine einfache Ansprache und Übergabe der einzelnen Elemente vorhanden. Die Umsetzung in einer anderen Sprache ist dennoch ohne Weiteres möglich.

### 11.1 UML-Aktivitätsdiagramm Viterbi-Algorithmus

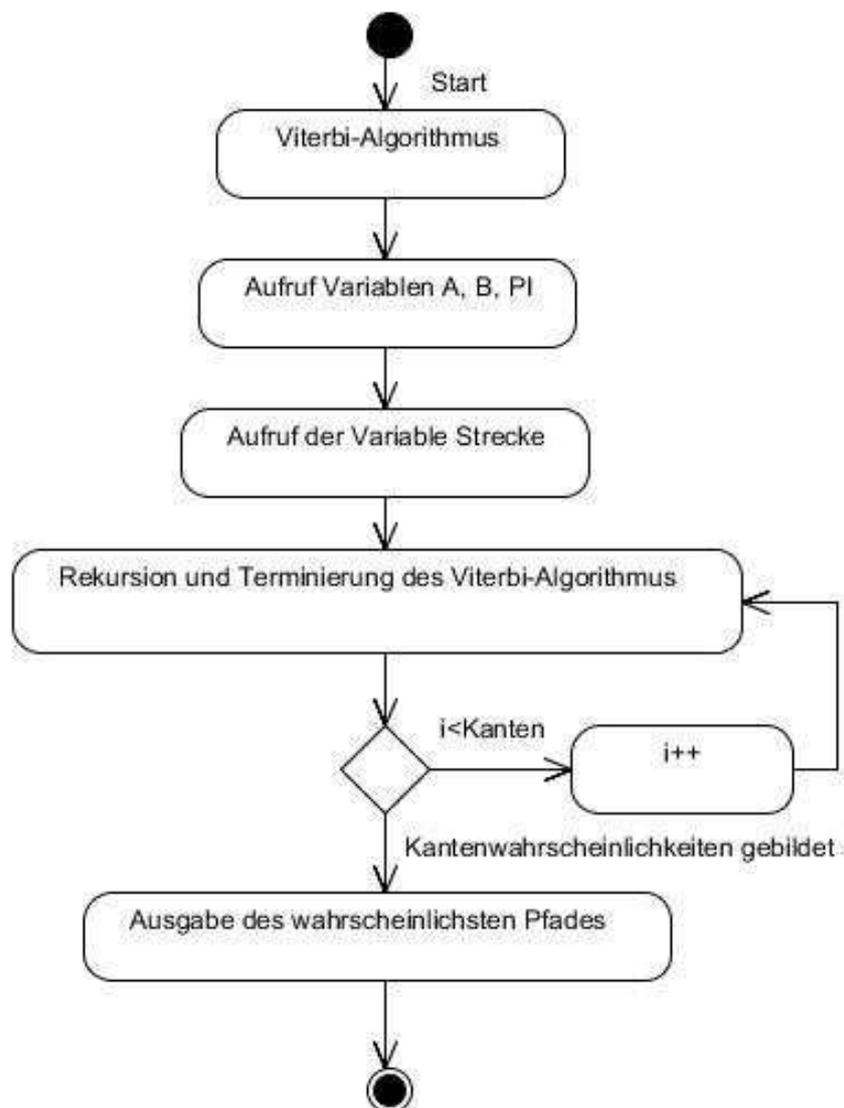


Abbildung 14: UML-Aktivitätsdiagramm des Viterbi-Algorithmus

Das Function File ist eine Datei die Funktionen, Variablen oder Unterprogramme enthalten.

Das Function File viterbi ruft zunächst die Wahrscheinlichkeiten der Matrizen A, B und des Vektors  $\pi$ , sowie die Parameter der Strecke auf.

Danach werden in einer Schleife die Wahrscheinlichkeiten der Kante gebildet. Aus den Wahrscheinlichkeiten der Kante werden das Maximum und der Zustand herausgesucht und in einem Array gespeichert.

Der Zustand wird an die nächste Kante übergeben und nur von diesem Knoten aus wird weiter gerechnet. Dies wird bis zum letzten Knoten durchgeführt, danach erfolgt die Ausgabe.

Eine Normalisierung findet über die Kantenwahrscheinlichkeit gegen den Underflow statt.

## 11.2 UML-Aktivitätsdiagramm Baum-Welch-Algorithmus

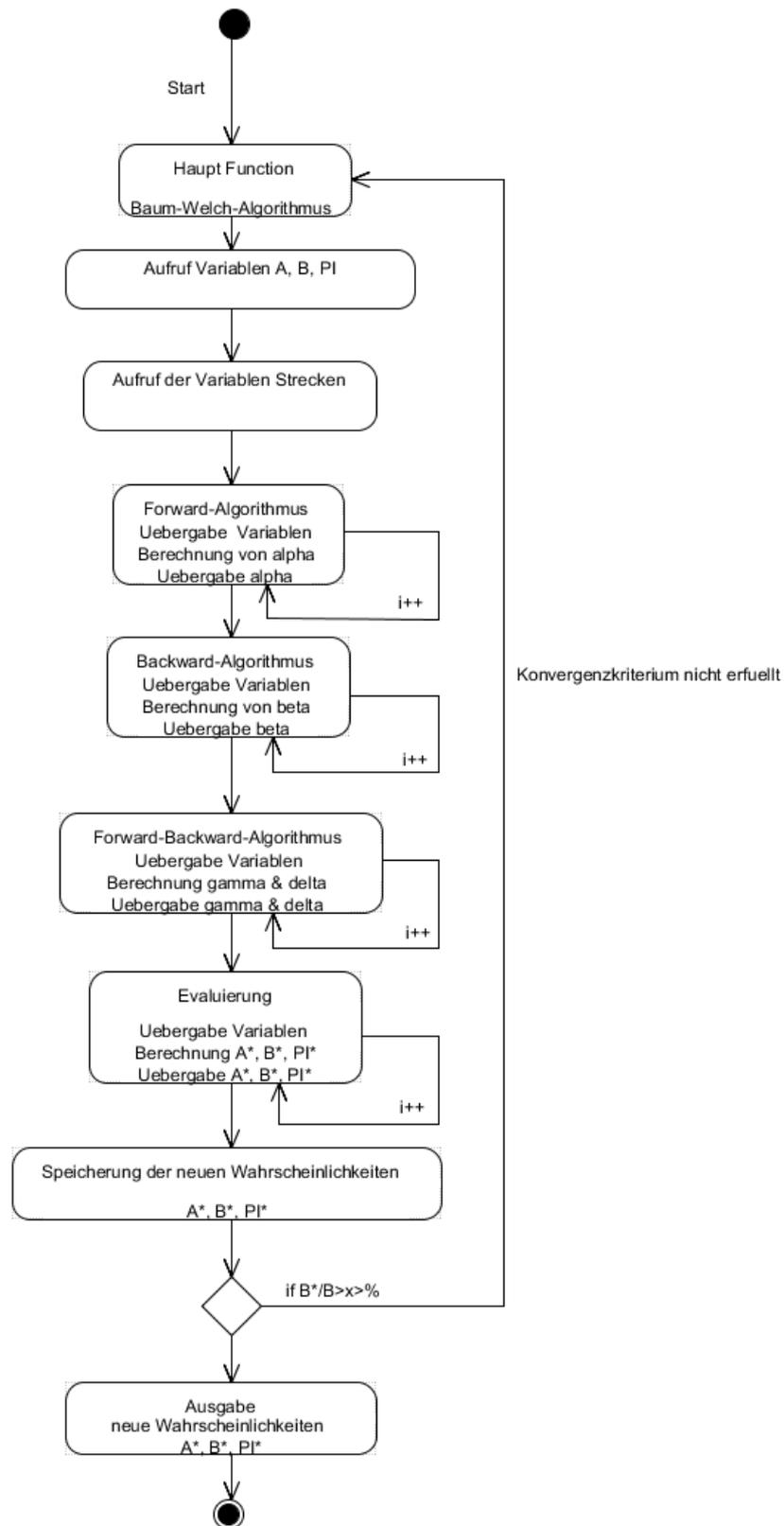


Abbildung 15: UML-Aktivitätsdiagramm des Baum-Welch-Algorithmus

Da beim Baum-Welch-Algorithmus wesentlich mehr Operationen auftreten, wurde ein Main File `baumwelch`, sowie Vier Function Files erstellt. Das dient vor allem der Übersichtlichkeit und erleichtert den Einstieg für andere Programmierer.

Zunächst werden die Parameter  $A$ ,  $B$ , und  $\pi$  (s.a. 10.1 Grundlegende Definitionen eines Hidden Markov Models, S. 25) aus einer Datei für diese Strecke geladen. Danach erfolgt die Ladung der Strecken aus einer weiteren Datei. Matlab und Octave beherrschen hierfür viele Formate.

Der Forward-Algorithmus benötigt die Arrays  $A$ ,  $B$ ,  $\pi$  und Anzahl der Emissionen. Diese werden an das Function File `forward` übergeben. Die Parameter werden in Zwei Schleifen berechnet. Eine zum Durchgehen der Zustände, eine zum Durchgehen der Kanten. Das Ergebnis wird im Array  $\alpha$  (s.a. 10.5.1 Forward-Algorithmus, S. 34) gespeichert. Über jede Kante wird normiert auf die Kantenwahrscheinlichkeit gegen den Underflow. Am Ende wird alles zu  $P(O|\lambda)$  (s.a. 10.1 Grundlegende Definitionen eines Hidden Markov Models, S. 25) aufsummiert. An die Hauptfunktion `baumwelch` werden  $P(O|\lambda)$  und  $\alpha$  zurückgegeben.

Der Backward-Algorithmus funktioniert analog. Hier gehen wir die Zeit Rückwärts. An das zugehörige Function File `backward` übergeben wir  $A$ ,  $B$ ,  $\pi$  und die Anzahl der beobachteten Emissionen. Danach wird wie beim Forward-Algorithmus, über zwei Schleifen die Wahrscheinlichkeit in jedem Knoten gebildet und die nächste Kante berechnet. Auch hier wird über jeder Kante normiert mit der Kantenwahrscheinlichkeit von  $\alpha$ , damit das Verhältnis  $\alpha$  zu  $\beta$  erhalten bleibt und die Wahrscheinlichkeit nicht verfälscht wird. Zurück gegeben wird  $\beta$  (s.a. 10.5.2 Backward-Algorithmus, S. 36).

An das Function File `forwardbackward` werden  $A$ ,  $B$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ , Anzahl und Art der beobachteten Emissionen,  $P(O|\lambda)$ , und Anzahl der Zustände übergeben.  $\gamma$  (s.a. 10.5.3 Kombination Forward-Backward-Algorithmus, S. 37) wird über vier Schleifen berechnet. Durch aufsummieren von  $\gamma$  über jeder Kante wird  $\delta$  gebildet.

$\delta$  (s.a. 10.5.3 Kombination Forward-Backward-Algorithmus, S. 37) wird über drei Schleifen bestimmt. Zurück gegeben werden  $\gamma$  und  $\delta$ .

Im letzten Function File evaluierung werden  $\delta$  und  $\mathbf{y}$  zur Bestimmung der neuen Wahrscheinlichkeiten übergeben.

Des Weiteren werden die benötigten Anzahlen der Zustände, Anzahl und Art der beobachteten Emissionen und die Routennummer übergeben.

Danach werden  $A^*$ ,  $B^*$ , und  $\pi^*$  (s.a. 10.5.3 Kombination Forward-Backward-Algorithmus, S. 37) berechnet. Zur Bestimmung der neuen Parameter werden die Zeitpunkte und Anzahl der unterschiedlichen Beobachtungen in einer weiteren Funktion bestimmt.

Die neuen Parameter  $A^*$ ,  $B^*$ , und  $\pi^*$  werden übergeben und mit den bisherigen Parametern verglichen und danach in der dafür vorgesehenen Datei gespeichert. Bei hinreichender Genauigkeit erfolgt die Ausgabe, ansonsten erfolgt die Wiederholung.

(Stein, 2011), (Schweizer, 2008)

## 12 Auswertung der Routenprofile

Eine Betrachtung der energetisch optimalen Route findet nach Treibstoffverbrauch zu Weg [kg/km] statt. Unter der Voraussetzung, dass eine vorgegebene Zeit der Containerschiffe eingehalten wird, sind zwei unterschiedlich lange Routen, nur dann energetisch gleichwertig, wenn Sie bezogen auf die Weglänge desselben Anfangs- und Endpunkts, denselben Treibstoffverbrauch haben.

Für die Strecken muss noch eine Kategorisierung der Beobachtungen stattfinden. Das bedeutet bei fünf Beobachtungen, fünf Intervalle zu denen der Treibstoffverbrauch zugeordnet wird. Bei einem Verbrauch von 147 kg/km im Mittel der Schiffsklasse, bietet sich die folgende Einteilung an.

**Tabelle 2: Unterteilung der Messungen des Treibstoffverbrauchs**

**Unterteilung der Messungen des Treibstoffverbrauches auf die Beobachtungen zur Klassenbildung für die Berechnungen**

Beobachtung 1	Beobachtung 2	Beobachtung 3	Beobachtung 4	Beobachtung 5
$< 130$ kg/ km	$130 \leq 140$ kg/ km	$140 \leq 150$ kg/ km	$150 \leq 160$ kg/ km	$160 <$ kg/ km

Zunächst werden die Wahrscheinlichkeiten der Zustände, Beobachtungen und der Startwahrscheinlichkeiten gebildet (s.a. 10.5 Der Baum-Welch-Algorithmus, S. 33).

Hierfür werden die Beobachtungen der Routen benötigt. (s.a. 10.5 Der Baum-Welch-Algorithmus, S. 33).

Da bisher nur von einer Route und einer Fahrt Messdaten vorhanden sind, erfolgt die Routenoptimierung mit zehn simulierten Routen mit einer Länge von 890-1200 Beobachtungen auf dieser Strecke. Die Funktionsweise bleibt die Gleiche. Die Festlegung der Wahrscheinlichkeiten erfolgt zuerst nach einer Abschätzung. Durch den Baum-Welch-Algorithmus erfolgt die Berechnung der richtigen Wahrscheinlichkeiten für die jeweilige Route.

Die Beobachtungen der Routen werden simuliert mit Hilfe von Zufallszahlen und haben unterschiedliche Längen. Die einzelnen Routen treten zusätzlich in unterschiedlicher Häufigkeit auf.

Die Abbildung 16, Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19, S. 46 zeigen die konvergierenden Werte, zu den für die Strecke charakteristischen Wahrscheinlichkeiten.

```

Initiale Zustandsdichte
0.200 0.200 0.200 0.200 0.200

Zustandsuebergangsmatrix
0.300 0.250 0.250 0.100 0.100
0.250 0.300 0.250 0.100 0.100
0.200 0.200 0.200 0.200 0.200
0.100 0.100 0.250 0.300 0.250
0.100 0.100 0.200 0.300 0.300

Beobachtungsmatrix
0.300 0.250 0.250 0.100 0.100
0.250 0.300 0.250 0.100 0.100
0.200 0.200 0.200 0.200 0.200
0.100 0.100 0.250 0.300 0.250
0.100 0.100 0.200 0.300 0.300
Elapsed time is 0.0869999 seconds
octave-3.6.1.exe:8>

```

Abbildung 16: Festlegung der Startwerte des Baum-Welch-Algorithmus

```

Initiale Zustandsdichte
0.241 0.271 0.183 0.147 0.158

Zustandsuebergangsmatrix
0.320 0.268 0.238 0.087 0.086
0.267 0.323 0.237 0.087 0.086
0.203 0.203 0.198 0.197 0.199
0.088 0.089 0.238 0.315 0.270
0.087 0.087 0.188 0.313 0.325

Beobachtungsmatrix
0.312 0.283 0.231 0.092 0.083
0.257 0.339 0.231 0.091 0.082
0.199 0.214 0.189 0.206 0.193
0.089 0.093 0.218 0.328 0.272
0.088 0.092 0.171 0.326 0.324
Elapsed time is 70.28 seconds
octave-3.6.1.exe:6> _

```

Abbildung 17: Konvergenz nach fünf Durchgängen der Startwerte des Baum-Welch-Algorithmus

```

Initiale Zustandsdichte
0.237 0.296 0.164 0.140 0.163

Zustandsuebergangsmatrix
0.337 0.282 0.228 0.078 0.076
0.280 0.341 0.227 0.077 0.074
0.206 0.207 0.197 0.195 0.196
0.079 0.080 0.227 0.328 0.286
0.077 0.076 0.178 0.324 0.345

Beobachtungsmatrix
0.314 0.289 0.235 0.088 0.074
0.256 0.348 0.236 0.087 0.073
0.201 0.211 0.195 0.206 0.187
0.086 0.086 0.210 0.333 0.284
0.084 0.083 0.162 0.330 0.340
Elapsed time is 348.423 seconds
octave-3.6.1.exe:7>

```

Abbildung 18: Konvergenz nach zehn Durchgängen der Startwerte des Baum-Welch-Algorithmus

```

Initiale Zustandsdichte
0.206 0.324 0.135 0.142 0.192

Zustandsuebergangsmatrix
0.357 0.298 0.218 0.066 0.062
0.296 0.366 0.215 0.064 0.059
0.211 0.211 0.200 0.190 0.187
0.068 0.068 0.213 0.344 0.308
0.064 0.063 0.164 0.336 0.373

Beobachtungsmatrix
0.305 0.288 0.239 0.096 0.071
0.243 0.350 0.242 0.096 0.069
0.203 0.205 0.201 0.212 0.179
0.094 0.086 0.202 0.326 0.292
0.093 0.082 0.152 0.321 0.352
Elapsed time is 697.516 seconds
octave-3.6.1.exe:8> _

```

Abbildung 19: Konvergenz nach 20 Durchgängen der Startwerte des Baum-Welch-Algorithmus

Wie in anderen Iterationsverfahren gibt es auch hier vereinzelte Werte, die zunächst in die falsche Richtung konvergieren wie Element  $\pi_{11}^*$  (s.a. Formel 26: Berechnung der neuen Startwahrscheinlichkeiten  $\pi_i^*$ , S. 39).

Bei den Startwahrscheinlichkeiten werden wenige Werte einbezogen und dementsprechend haben zufällige lokale Häufungen einen größeren Einfluss. Hier ist die notwendige große Stichprobenmenge besonders ersichtlich.

Das größte Problem besteht allerdings darin, dass es unter Umständen möglich ist, in einem lokalen Maximum zu verharren.

Die Wahrscheinlichkeiten konvergieren nur in Abhängigkeit der Anfangswahrscheinlichkeiten und der Beobachtungen. Die im Baum-Welch-Algorithmus berechneten Start-, Zustands- und Beobachtungswahrscheinlichkeiten der Strecke, werden im nächsten Schritt im Viterbi-Algorithmus benötigt.

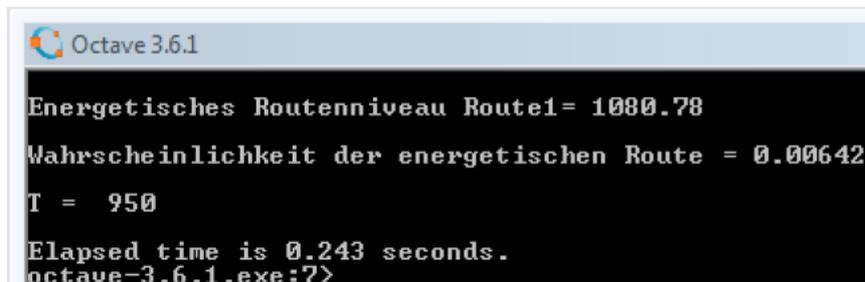
Der Viterbi-Algorithmus ordnet den Beobachtungen der jeweiligen Route den energetisch wahrscheinlichsten Pfad zu. Aus der Summe der Elemente des energetisch wahrscheinlichsten Pfades, ergibt sich das energetische Routenniveau. Die einzelnen Zustände des energetisch wahrscheinlichsten Pfades sind das energetische Routenprofil.

Die Aussagekraft der Wahrscheinlichkeit eines Pfades ist sehr begrenzt, da die Wahrscheinlichkeit mit der Pfadlänge sehr klein oder durch die Normierung verzerrt wird und keine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Routen zulässt. Hier ist nur ein Vergleich der einzelnen Pfadwahrscheinlichkeiten innerhalb einer Route begrenzt Aussagekräftig.

Für die Bewertung einer Route eines Containerschiffs sind das energetische Routenniveau, die energetische Bewertung der gesamten Route und die einzelnen energetischen Routenabschnitte (energetisches Routenprofil) am bedeutendsten.

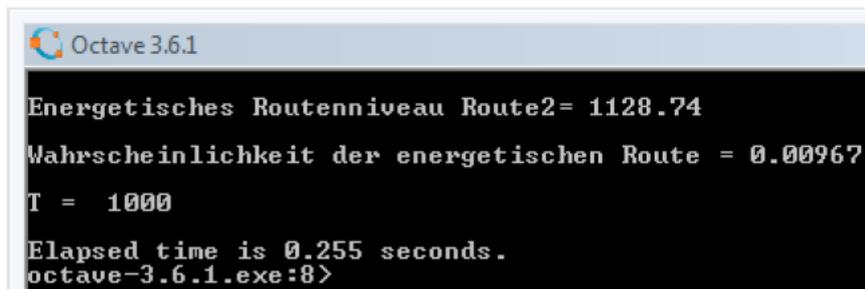
Bei den Definitionen des Hidden Markov Models ist  $T$  (s.a. 10.1 Grundlegende Definitionen eines Hidden Markov Models, S. 25) beschrieben, als die Länge der Beobachtungssequenz, Anzahl der Beobachtungen. Da wir pro Routenabschnitt eine Beobachtung haben, bedeutet ein größeres  $T$ , eine längere Route.

Die Zufallszahlen der Routen 3 und 7 sind bezüglich der Beobachtungen so angelegt, dass die Intervalle eine besonders gute und eine besonders schlechte Route simulieren.



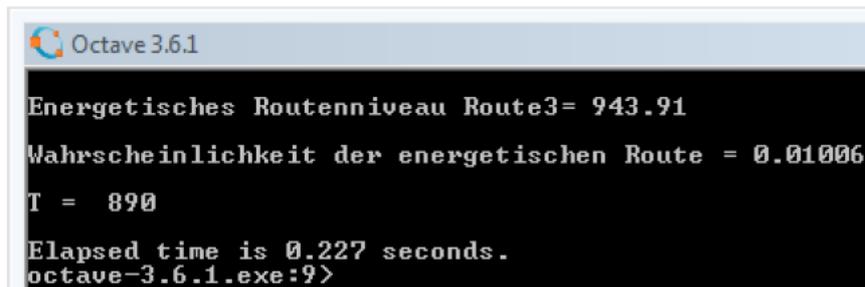
```
Octave 3.6.1
Energetisches Routenniveau Route1= 1080.78
Wahrscheinlichkeit der energetischen Route = 0.00642
T = 950
Elapsed time is 0.243 seconds.
octave-3.6.1.exe:7>
```

Abbildung 20: Energetische Bewertung von Route 1



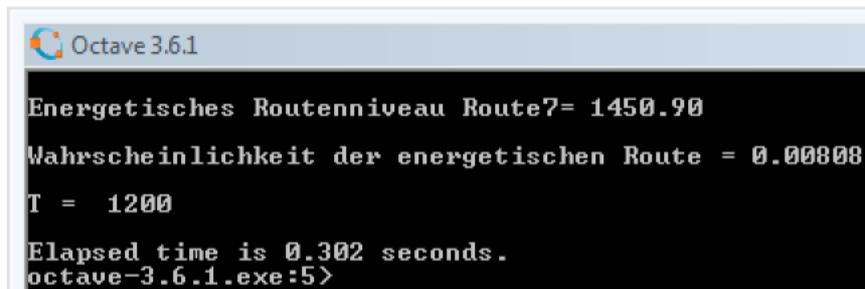
```
Octave 3.6.1
Energetisches Routenniveau Route2= 1128.74
Wahrscheinlichkeit der energetischen Route = 0.00967
T = 1000
Elapsed time is 0.255 seconds.
octave-3.6.1.exe:8>
```

Abbildung 21: Energetische Bewertung von Route 2



```
Octave 3.6.1
Energetisches Routenniveau Route3= 943.91
Wahrscheinlichkeit der energetischen Route = 0.01006
T = 890
Elapsed time is 0.227 seconds.
octave-3.6.1.exe:9>
```

Abbildung 22: Energetische Bewertung der Route 3



```
Octave 3.6.1
Energetisches Routenniveau Route7= 1450.90
Wahrscheinlichkeit der energetischen Route = 0.00808
T = 1200
Elapsed time is 0.302 seconds.
octave-3.6.1.exe:5>
```

Abbildung 23: Energetische Bewertung der Route 7

Ein höheres energetisches Routenniveau bedeutet einen höheren Energieverbrauch. Damit die Abstände der energetischen Zustände denen des Treibstoffverbrauches entsprechen, werden diese auf die Intervalle des Treibstoffverbrauches skaliert.

Aus den Abbildungen (s.a. Abbildung 20: Energetische Bewertung von Route 1, Abbildung 21: Energetische Bewertung von Route 2, Abbildung 22: Energetische Bewertung der Route 3 und Abbildung 23: Energetische Bewertung der Route 7, S. 48) ist schnell ersichtlich, dass ein längerer Fahrweg, sich sehr stark im energetischen Routenniveau auswirkt. Zum Beginn dieses Kapitels wurde bereits beschrieben, dass der längere Fahrweg nur energetisch gleichwertig ist, wenn dieser um den Faktor des längeren zum kürzeren Fahrweg, auf den einzelnen Routenabschnitten weniger Energie verbraucht.

Im Kapitel Einführung SEEMP werden die Key Performance Indicator (s.a. 7.5 Key Performance Indicator, S. 15) als Leistungsindikatoren zum Vergleich der Schiffe vorgestellt. Zur Erstellung eines Key Performance Indicator bietet sich die Navigationsleistung oder auch Fahrleistung an. Dafür wird aus den einzelnen energetischen Routenniveaus ein Mittelwert gebildet.

Bei den 4 herausgesuchten Routen 1-3 und 7 (s.a. Abbildung 20: Energetische Bewertung von Route 1, Abbildung 21: Energetische Bewertung von Route 2, Abbildung 22: Energetische Bewertung der Route 3 und Abbildung 23: Energetische Bewertung der Route 7, S. 48) aus den 10 erstellten Routen, auf derselben Strecke ist der Mittelwert der energetischen Routenniveaus  $\bar{x} = 1167$ .

Hieraus ergibt sich ein sehr guter KPI für das Containerschiff auf Route 3. Auf Route 1 ergibt sich ein guter KPI, auf Route 2 ein mittlerer KPI. Für das Containerschiff auf Route 7 ergibt sich ein schlechter KPI.

Bei den auffälligen Routen Route 3 und 7 lohnt sich ein eine genauere Analyse.

Bei dem negativen Routenniveau von Route 7 ist eine Häufung der negativen energetischen Zustände 4 und 5 festzustellen (s.a. Abbildung 26: Häufigkeiten der energetischen Zustände von Route 3, S. 51).

Dieser Effekt wird zusätzlich durch den im Vergleich zu den anderen Routen längeren Fahrweg verstärkt.

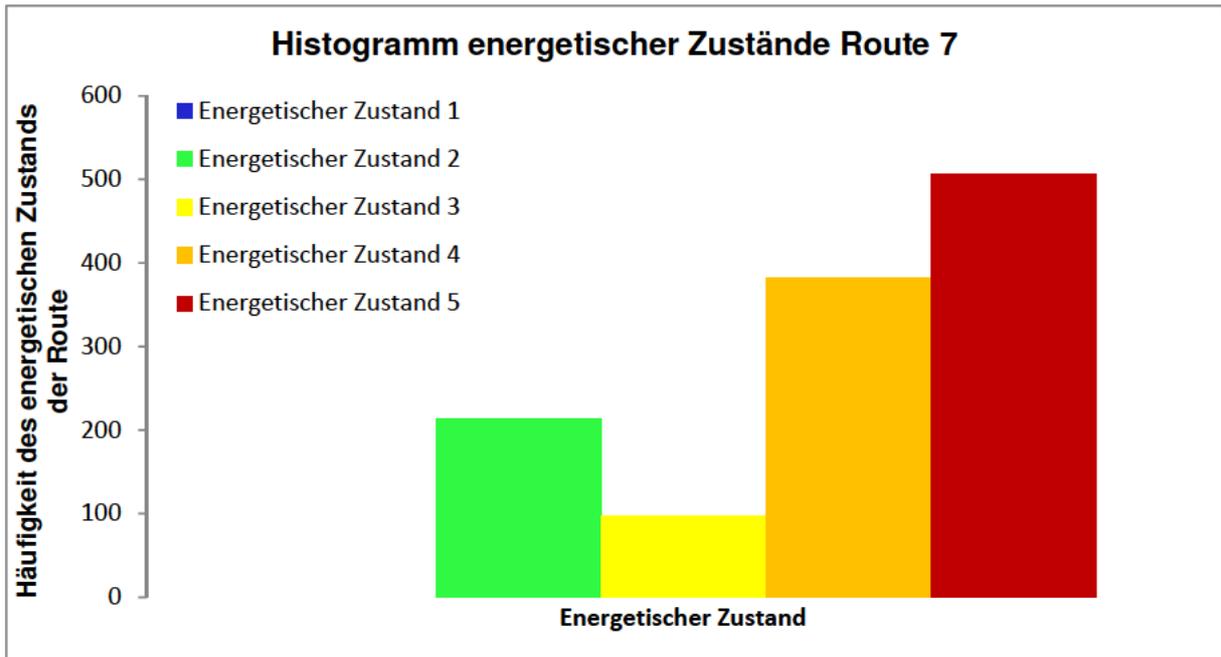


Abbildung 24: Häufigkeiten der energetischen Zustände von Route 7

Auf welchen Streckenabschnitten die negativen Zustände aufgetreten sind, wird aus dem Routenprofil ersichtlich.

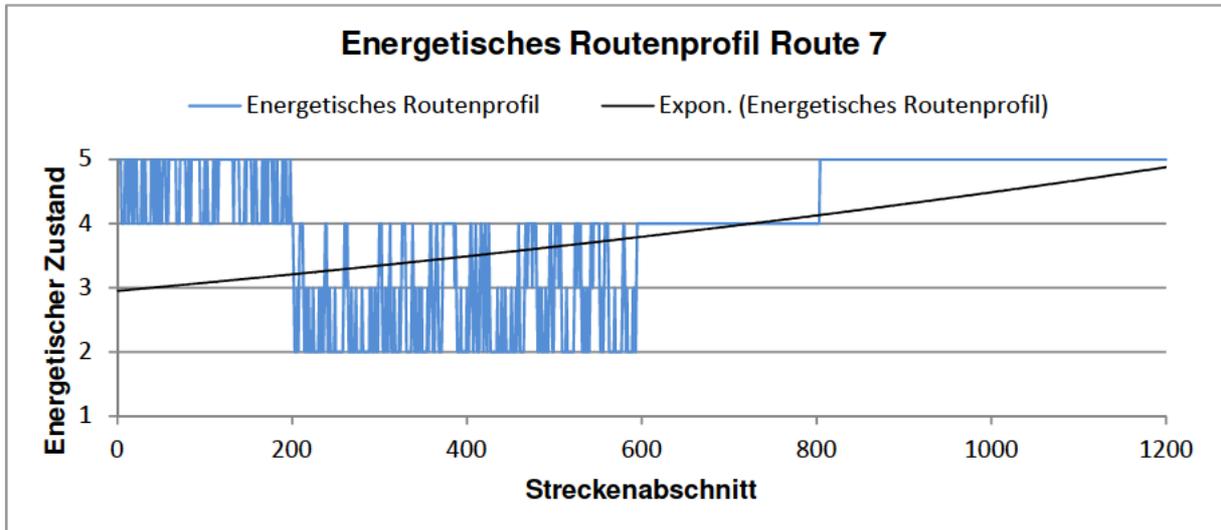


Abbildung 25: Energetische Zustände der Streckenabschnitte von Route 7

Aus dem energetischen Routenniveau von Route 7 (s.a. Abbildung 23: Energetische Bewertung der Route 7, S. 48) wird schnell ersichtlich, dass die Route energetisch nicht optimal gefahren wurde. Aus dem Häufigkeitsdiagramm geht das ebenfalls sehr anschaulich hervor.

Der Grund ist die Häufigkeit der negativen energetischen Zustände 4 und 5 (s.a. Abbildung 24: Häufigkeiten der energetischen Zustände von Route 7, S. 50).

Das energetische Routenprofil (s.a. Abbildung 25: Energetische Zustände der Streckenabschnitte von Route 7, S. 50) zeigt, dass am Anfang bis Streckenabschnitt 200 zu viel Energie verbraucht wurde, dasselbe gilt von Streckenabschnitt 600 bis zum Ende, aufgrund der Häufung der negativen energetischen Zustände 4 und 5.

In diesen Routenabschnitten wurde eine energetisch ungünstige Route gewählt. Diese Route sollte bei zukünftigen Fahrten vermieden werden.

Zwischen Streckenabschnitt 600 bis 800 ist ein Verbleib im energetischen Zustand 4 sichtbar. Sowie zwischen Streckenabschnitt 800 bis 1200 ein Verbleib im energetischen Zustand 5 erkennbar. Im Bereich des Routenabschnitts 600-1200 wechseln die Beobachtungen, aber von 4 bis 5 zufällig.

Der Grund ist, dass der energetische Zustand berechnet wird. Dieser hängt in erster Linie von den Beobachtungen ab, aber die Übergangswahrscheinlichkeit kann bei ähnlichen Beobachtungswahrscheinlichkeiten zum Verbleib im energetischen Zustand führen. Dies ist wichtige Eigenschaft des Hidden Markov Modells, weil Rückschlüssen auf den verborgenen Prozess geschlossen werden sollen.

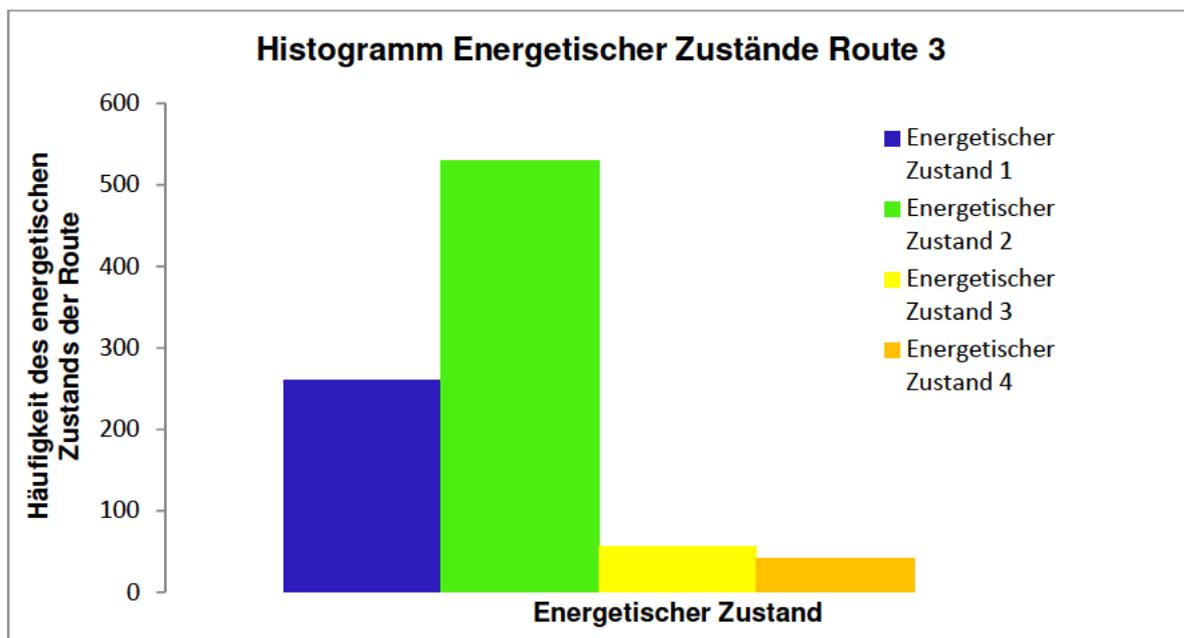


Abbildung 26: Häufigkeiten der energetischen Zustände von Route 3

Das Histogramm von Route 3 (s.a. Abbildung 26: Häufigkeiten der energetischen Zustände von Route 3, S. 51) zeigt eine Häufung der positiven energetischen Zustände 1 und 2. Das ist aufgrund des positiven energetischen Routenniveaus zu erwarten gewesen (s.a. Abbildung 22: Energetische Bewertung der Route 3, S. 48). Die Häufung der positiven energetischen Zustände und die Länge der Route wirken sich positiv auf das energetische Routenniveau aus.

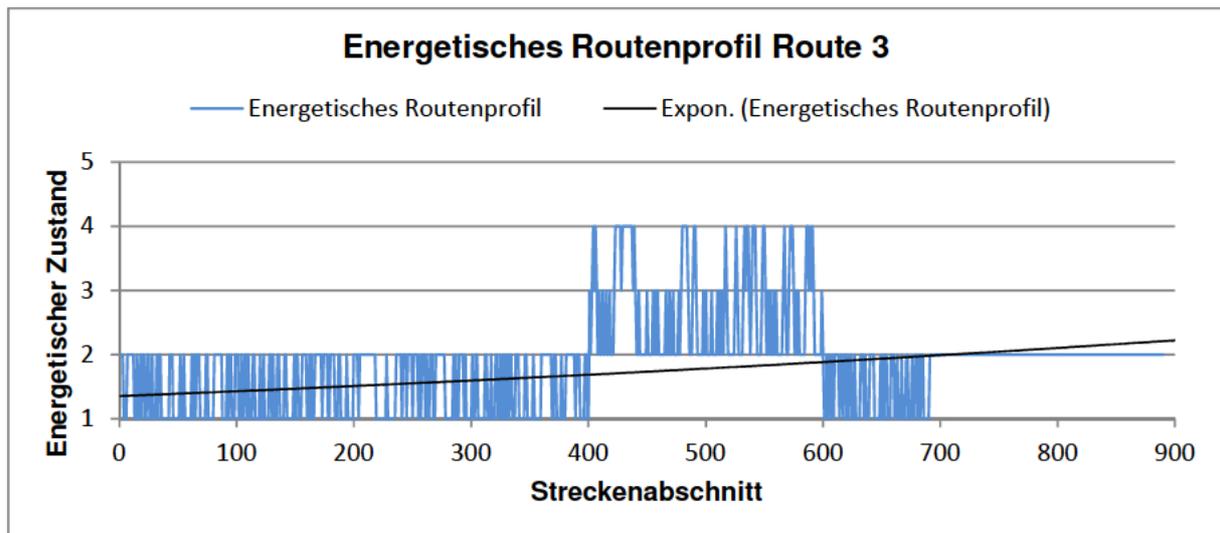


Abbildung 27: Energetische Zustände der Streckenabschnitte von Route 3

Aus dem energetischen Routenprofil von Route 3 (s.a. Abbildung 27: Energetische Zustände der Streckenabschnitte von Route 3, S. 52) geht hervor, dass der Routenabschnitt vom Anfang bis zum Streckenabschnitt 400, ein gutes bis sehr gutes energetisches Profil aufweist, energetischer Zustand 1 und Zustand 2.

Der mittlere Streckenabschnitt weist ein eher mittleres energetisches Routenprofil auf, energetischer Zustand 3. Zwischen Routenabschnitt 600 und 690 findet sich wieder ein gutes bis sehr gutes energetisches Routenprofil. Am Ende verbleibt das Routenprofil in einem guten energetischen Zustand 2.

Hier wechseln die Beobachtungen zwischen Beobachtung 3 mittlerer Treibstoffverbrauch und Beobachtung 2 geringen Treibstoffverbrauch. Die Wahrscheinlichkeiten der energetischen Zustände sind für den energetischen Zustand 2 am höchsten. Daher verbleibt der energetische Zustand.

Bei anderen Zustands-/Beobachtungswahrscheinlichkeiten sind mehr Wechsel oder auch weniger Wechsel des Zustandes auf der Route möglich.

Für Route 3 gilt, dass diese in Zukunft möglichst häufig gefahren werden sollte. Daher wird diese Route zunächst als Standard Route dieser Strecke festgelegt, weil sie ein sehr positives energetisches Routenprofil und Routenniveau hat.



**Abbildung 28: Energetisches Routenprofil von Route 3 großer Kartenausschnitt**  
Karte in Google-Maps erstellt und Route 3 simuliert

In der Abbildung des energetischen Routenprofils von Route 3 auf einer Karte (s.a. Abbildung 28: Energetisches Routenprofil von Route 3 großer Kartenausschnitt, S. 53) ist der farblich gekennzeichnete energetische Verlauf und der örtliche Bezug anschaulich zu entnehmen. Hiermit lassen sich kritische Seegebiete und Strömungen erkennen und vermeiden. Die Berechnungen der Routenabschnitte und die Einfärbungen entsprechen, denen des Hidden Markov Models. Die Karte wurde bei Google Maps erstellt und die Route ist simuliert.

Bei näherer Betrachtung (s.a. Abbildung 29: Energetisches Routenprofil von Route 3 kleiner Kartenausschnitt, S. 54) werden die einzelnen bewerteten Streckenabschnitte sichtbar.



Abbildung 29: Energetisches Routenprofil von Route 3 kleiner Kartenausschnitt  
Karte in Google-Maps erstellt und Route 3 simuliert

Nach der Festlegung von Route 3 als Standard Route und nach einer ausreichenden Stichprobenmenge, durch Messdaten der Schiffe die Route 3 auf der Strecke befahren haben, fließen die Ergebnisse erneut in das Modell mit ein. Zunächst wird überprüft, ob durch das Befahren der Route 3 Treibstoff eingespart wurde.

Bei einem negativen Ergebnis müsste das Modell überprüft werden.

Bei einem positiven Ergebnis werden mit den neuen Beobachtungen, neue Wahrscheinlichkeiten gebildet und von der besten Route, Route 3, wiederum die beste Route gebildet und das Modell verbessert sich selbst. Bei der 20.000 km langen Strecke Hamburg-Shanghai beträgt die  $CO_2$  Einsparung bei zehn Fahrten pro Jahr und einer Einsparung von 3% Treibstoff durch Routenoptimierung, bei einem Containerschiff der Super-Panamax-Klasse ca. 2767 t $CO_2$ /a.

(Stern, 2008), (Verlag Heinrich Vogel, 2011)

## 13 Diskussion

Das Ziel dieser Arbeit ist, eine Methode zur Verringerung des Energieverbrauches in der Seeschifffahrt zu entwickeln und somit einen Beitrag zur Verringerung der schädlichen Emissionen zu bewirken. Als Grundlage wurden verschiedene Verfahren und Ansätze zur Energieeinsparung, als auch die unterstützenden Prozesse durch die Einführung des Ship Energy Efficiency Management Plan diskutiert und verglichen. Durch die Routenoptimierung ist eine Reduzierung des Treibstoffverbrauchs und somit der schädlichen Emissionen zu erwarten.

Zur erfolgreichen Etablierung müssen die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen eingehalten werden. Durch die Wahl des Modells zur Routenoptimierung sind nur wenige Messparameter zu erfassen. Der Aufwand an Personal ist im Vergleich zu anderen energieeinsparenden Verfahren sehr gering. Die Standortunabhängigkeit und die Anwendung auf im Betrieb befindlichen Schiffen sind ein großer Vorteil. Die Investitionskosten sind im Vergleich zu konstruktiven Maßnahmen ebenfalls sehr gering.

Durch die Einführung des Ship Energy Efficiency Management Plan werden Maßnahmen zur Energiereduzierung und zur Qualifizierung und Quantifizierung der Verbesserung der Energieeffizienz durch KPIs gefordert. Das wurde anhand der Routenoptimierung und der Definition der energetischen Routenniveaus erfüllt, als auch die Grundlage für weitere KPIs geschaffen.

Eine einfache und leicht verständliche Präsentation der Ergebnisse des Hidden Markov Modells ist notwendig. Die anschauliche und leicht verständliche Präsentation der Ergebnisse, als Ausdruck auf einer Karte mit farblichen energetischen Zuständen ist gelungen.

## 14 Perspektiven und Ausblick des Projektes

Für die Einführung vom Ship Energy Efficiency Management Plan ist Anfang Mai, eine weitere Abschlussarbeit begonnen worden. Diese handelt von der Energieflussanalyse auf Containerschiffen.

Bezüglich der Routenoptimierung hat diese Abschlussarbeit den Grundstein der Routenoptimierung gelegt. Für die Reedereien sind die Analysen zahlreicher weiterer Strecken in geplant.

Die Festlegung der Startparameter des Baum-Welch-Algorithmus anhand von Näherungsverfahren ist ein Bereich, der ebenfalls in einer Studie thematisiert werden kann.

Im Rahmen des Masterstudiums eines Studenten ist als Studienprojekt, bereits die Vorhersage des Einflusses des Wetters auf den Treibstoffverbrauch mittels des Hidden Markov Modells angelaufen.

Die Anzeige des aktuellen Verbrauches in einem Display auf der Brücke, zur zeitnahen Rückmeldung wie im Auto üblich, soll anhand der Routenoptimierung erfolgen.

Die automatische Einbindung an das JEVIS, mit automatischer Auswertung und aktueller Verbrauchsanzeige, mit Ort des Schiffes und Bewertung des Verbrauches der abgefahrenen Teilstrecken durch Benchmarking der KPI, eingebunden mit dem JEGIS soll erfolgen.

Die Funktionen der geschriebenen Programme können verfeinert werden.

Der Viterbi-Algorithmus bietet die Möglichkeit, einen zweiten oder dritten Pfad berechnen zu lassen. Da der über das Kantenmaximum gebildete wahrscheinlichste Pfad, nicht in jedem Fall das Maximum der Pfadwahrscheinlichkeiten darstellt.

## **15 Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich dieses Dokument nur anhand der angegebenen Quellen in eigenständiger Arbeit ohne Fremde mithilfe erstellt habe.

Hamburg, den 26. Juni 2012 \_\_\_\_\_

Mario Armah

## 16 Literaturverzeichnis

- Envidatec GmbH. (11/2011). *Unternehmensprofil Kompetenzen Referenzen*. Hamburg.
- International Maritime Organization. (2009). *Second IMO GHG Study 2009*.
- ABS Nautical Systems. (03 2012). Developing Energy Efficiency Management Plans. *ABS Nautical Systems News* , 1-4.
- Baltic Exchange, Marintek, Intermanager, Norges Forskningsgrad. (09/2009). Shipping KPI Project. London.
- Blaßkiewitz, T. (2000-2001). *Das Travelling-Salesman-Problem oder das Problem des Handlungsreisenden*. Universität Leipzig, Leipzig.
- Blunsom, P. (08/2004). *A Revealing Introduction to Hidden Markov Models*. University of Melbourne, Melbourne.
- Bunk, D. (02/2011). *Grundlage für zukünftige Steuervorteile: Energiemanagementsysteme*. TÜV SÜD Industrie Service GmbH.
- Bunk, D. M. (20/2011). *Grundlage für zukünftige Steuervorteile: Energiemanagementsysteme*. TÜV SÜD Industri Service GmbH.
- Carbon positive. (2011). *Carbon Emissions Navigator 2011*.
- Carstensen, K.-U., Ebert, C., & Ebert, C. (11/2009). *Computerlinguistik und Sprachtechnologie: Eine Einführung* (3. Auflage Ausg.). (S. Jekat, Hrsg.) Deutschland: Spektrum Akademischer Verlag.
- Det Norske Veritas AS. (09/ 2011). *DNV SEEMP Guideline – Why, What and How*.
- E. Günther, U. J. (Nr.22/2006). *Klimaschutz / Emissionshandel*. TU-Dresden, Dresden.
- Endresen Øyvind, M. E. (11/2008). *The Environmental Impacts of Increased International Maritime Shipping*. OECD/ITF Global Forum on Transport and Environment in a Globalising World, Guadalajara.
- Esantos. (10/2011). *Main events in IMO's work on limitation and reduction of greenhouse gas emissions from international shipping*. International Maritime Organization.
- Feynman, R., & Leighton, R. (1985). *Surely You're Joking, Mr. Feynman!: Adventures of a Curious Character* (1.Auflage Ausg.). (W. W. Norton, Hrsg.)
- FutureShip GmbH. (2012). *Eco Chances*. Hamburg.
- FutureShip GmbH. (2012). *Eco Solution*. Hamburg.
- FutureShip GmbH. *FS Equilibrium*. Hamburg.
- FutureShip GmbH. *FS Flow*. Hamburg.
- Haenelt, K. (06/2007). *Der Viterbi-Algorithmus im Part-of-Speech Tagging*.
- Hennig, D. F. (10/2011). *SEEMP – Umsetzung und wirtschaftlicher Nutzen*. Operations Practice FutureShip.
- Höbel, J. (11/2010). *Einführung in Hidden Markov Models am Beispiel der Spracherkennung*.
- HypoVereinsbank- Global Shipping Division. (2008). *Trendstudie Green Shipping*.
- International Maritime Organization. (07/2011). MARPOL 73/78 Annex VI Chapter 4.
- Lieback, P. J. (06/2011). *Leitfaden zum effizienten Energiemanagement*. Gutcert-Energieteam.
- McCallum, A. (03/2004). *Hidden Markov Models Baum Welch Algorithm Introduction to Natural Language Processing*. University of Massachusetts Amherst, Amherst.
- MEPC. (2009). *Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index*. International Maritime Organization, London.
- Mohr, R. (2008). *Statistik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Grundlagen und Anwendungen statistischer Verfahren* (2. Auflage Ausg.). (e. Verlag, Hrsg.)
- Moosmayer, V. ( 01/2011 ). *Energiemanagementsysteme*. Umweltgutachterausschusses BMU.
- Moss, L. (2008). *Example of the Baum-Welch Algorithmus*. Indiana University.
- Pahlke, D. F. (2011). *Zwischenbericht Envidatec GmbH an die Innovationsstiftung Hamburg, Teil 1-4*.

- Rabiner, L. (1989). *A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition*. Proceedings of the IEEE, vol. 77, pp. 257-286.
- Schweizer, W. (2008). *Matlab kompakt, 3. Auflage*. Oldenbourg Verlag.
- Stamp, M. (01/2012). *A Revealing Introduction to Hidden Markov Models*. San Jose State University, San Jose.
- Stein, U. (2011). *Einstieg in das Programmieren mit MATLAB, (3. Auflage Ausg.)*. (H. Verlag, Hrsg.) Deutschland.
- Stern. (2008). Was die Welt zusammenhält. *Stern* (29/2008).
- T5/1.01, R. (08/2009). *GUIDANCE FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP)*. IMO, London.
- T5/1.01, R. (08/2009). *GUIDELINES FOR VOLUNTARY USE OF THE SHIP ENERGY EFFICIENCY OPERATIONAL INDICATOR (EEOI)*. INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, London.
- Verlag Heinrich Vogel. (2011). CO2 Berechnung. *Verkehrsrundschau* (01-04), 30-40.
- Waldmann, H. H., & Stocker, U. M. (2004). *Stochastische Modelle, Eine anwendungsorientierte Einführung* (1. Auflage Ausg.). (S. V. Berlin, Hrsg.)
- Weinard, M. (2007). *Graphen, Algorithmen und Modelle, Skript Sommersemester*. Universität Frankfurt, Frankfurt.
- Wunsch, H. (08/2001). *Der Baum-Welch Algorithmus für Hidden Markov Models, ein Spezialfall des EM Algorithmus*.
- Yigitbas, E. (4/2010). *Text Labeling mit Sequenzmodellen*. IDSE-Universität Paderborn, Paderborn.

# 17 Anhang

## 17.1 Programm Viterbi-Algorithmus

% ©Mario Armah, Hamburg, Deutschland, 2012, entwickelt im Rahmen der Abschlussarbeit Envidatec GmbH

%Viterbi-Algorithmus

```
function viterbi()
clc
tic
%Laden der zu evaluierenden Strecke
load ("ev.txt", "Strecke3");
load va [A] [B] [H]
InitialeZustandsdichte=H;
Strecke3;
%Feststellung Anzahl der Beobachtungen
T=length(Strecke3);
POtQt=1;
underflow(T)=0;
%*****
clc
%Anzahl der Zustaeude, zur Bestimmung der Haeufigkeit der Berechnung der Knoten
AnzahlZustaende=length(InitialeZustandsdichte);

%Festlegen der Anfangswahrscheinlichkeit der Zustaeude
for i=1:1:AnzahlZustaende
    Startzustand(i)=[InitialeZustandsdichte(i)*B(i,Strecke3(1))];
end

[Startzustand,i]=max(Startzustand);
Bewertung=i;
switch Bewertung
    case 1
        VektorenergetischerZustaende(t)=1;
    case 2
        VektorenergetischerZustaende(t)=1.07;
    case 3
        VektorenergetischerZustaende(t)=1.14;
```

```

        case 4
        VektorenergetischerZustaende(t)=1.21;
        case 5
        VektorenergetischerZustaende(t)=1.28;
    end

%Durchlaufen der Kanten zur Bestimmung der Kantenenmaxima
for t=2:1:T

%Durchlaufen der Zustaende zur Erfassung der Wahrscheinlichkeiten
    for j=1:1:AnzahlZustaende

        delta(j)=[A(i,j)*B(j,Strecke3(t))];
        underflow(t)=delta(j)+underflow(t);
    end
    %delta(:)=delta(:)/underflow(t)

    [deltamax,i]=max(delta);

    Bewertung=i;
    switch Bewertung
        case 1
        VektorenergetischerZustaende(t)=1;
        case 2
        VektorenergetischerZustaende(t)=1.07;
        case 3
        VektorenergetischerZustaende(t)=1.14;
        case 4
        VektorenergetischerZustaende(t)=1.21;
        case 5
        VektorenergetischerZustaende(t)=1.28;
    end

end
VektorenergetischerZustaende;
Routenniveau=sum(VektorenergetischerZustaende);
Wahrscheinlichsterpfad=deltamax*Startzustand;
printf("\nEnergetisches Routenniveau Route3= %3.2f \n\nWahrscheinlichkeit der energetischen Route
= %.5f\n",Routenniveau,Wahrscheinlichsterpfad);
printf("\n");

```

```
T
printf("\n");
toc

save ("ev3", "VektorenergetischerZustaende");
```

## 17.2 Programm Baum-Welch-Algorithmus

### 17.2.1 Hauptprogramm

```
% ©Mario Armah, Hamburg, Deutschland, 2012, entwickelt im Rahmen der Abschlussarbeit Envidatec
GmbH
%Main File Baum-Welch Algorithmus

function baumwelch()
tic
Konvergenzkriterium=2;

%Erstellen aller Routen einer Strecke
load ("ev.txt", "Strecke1", "Strecke2","Strecke3","Strecke4", "Strecke5","Strecke6","Strecke7",
"Strecke8", "Strecke9","Strecke10");
%while Konvergenzkriterium<.99||1.01<Konvergenzkriterium];%];%];%];%

%Auslesung der Wahrscheinlichkeiten in den Matrizen
%fuer die Zustandsuebergangswahrscheinlich A, der Matrix Beobachtungswahrscheinlichkeit B,
%und der Matrix der Startwahrscheinlichkeiten H=InitialeZustandsdichte
for g=1:1:1
load va [A] [B] [H]

InitialeZustandsdichte=H;
gamma=0;
delta=0;
Streckenarray={Strecke1,Strecke2,Strecke2,Strecke3,Strecke4,Strecke5,Strecke6,Strecke7,Strecke8,
Strecke9,Strecke10,Strecke9,Strecke10};

%Feststellung der Anzahl der Strecken mit notwendiger vorheriger Konvertierung
KonvertierungAnzahlStrecke=cellfun(@length,Streckenarray);
AnzahlStrecke=length(KonvertierungAnzahlStrecke);

%Anzahl der Zustaende, zur Bestimmung der Haeufigkeit der Berechnung der Knoten
AnzahlZustaende=length(InitialeZustandsdichte);

%Anzahl der Beobachtungen, zur Bestimmung der Haeufigkeit der Berechnung der Knoten
AnzahlBeobachtungen=length(B);

clc
```

```

%Einzelnes Durlaufen aller Routen einer Strecke zur Wahrscheinlichkeitsbestimmung
%der jeweiligen Route
for Strecke=1:1:AnzahlStrecke
BeobachtungStrecke=[Streckenarray{[Strecke]};

%Anzahl der Emissionen einer Route, zur Bestimmung der Haeufigkeit der Berechnung an einer Kante
T=length(BeobachtungStrecke);

%Uebergabe und Auslesung der berechneten Wahrscheinlichkeiten fuer den
%Forward Algorithmus, der Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer
%gegebenen Beobachtungsfolge
[alpha,POQ,underflow]=feval(@forward,T,[A],[B],[BeobachtungStrecke],[InitialeZustandsdichte],Anzahl
Zustaende);

%Uebergabe und Auslesung mit dem Backward-Algorithmus, gibt die bedingte
%Wahrscheinlichkeit der Beobachtungen/
%Emissionen aus den energetischen Zuständen wieder
[beta]=feval(@backward,T,[A],[B],[BeobachtungStrecke],AnzahlZustaende,[underflow]);

%Uebergabe und Auslesung Forward/-Backward Algorithmus, Zur Berechnung der
Übergangswahrscheinlichkeiten
%einer Zustandsfolge Q, der Wahrscheinlichkeit das dem energetischen Zustand q1 zum Zeitpunkt j,
%der energetische Zustand q2 zum Zeitpunkt j+1 folgt
[delta,gamma]=feval(@forwardbackward,T,[A],[B],[BeobachtungStrecke],AnzahlZustaende,[alpha],[bet
a],POQ,Strecke,gamma,delta);
%delta
%sum(sum(delta(Strecke,:;)))
end

%Auswertung Baum-Welch Algorithmus
[Uebergangswahrscheinlichkeit,Beobachtungswahrscheinlichkeit,Startwahrscheinlichkeit]=feval(@eval
uierung,T,[delta],[gamma],[BeobachtungStrecke],...
AnzahlZustaende,AnzahlBeobachtungen,AnzahlStrecke,[Streckenarray],Strecke);

%Zuweisung der Wahrscheinlichkeiten an die zugehörigen Arrays
H=Startwahrscheinlichkeit;
A=Uebergangswahrscheinlichkeit;
Bneu=Beobachtungswahrscheinlichkeit;

```

```

%Ueberprüfung ob durch Null geteilt wird und Verhinderung, durch setzen des Konvergenzkriteriums
auf 1,
%wenn die Unterschiede zwischen alter und neuer Wahrscheinlichkeit sehr klein sind
divisionnull=B(1,1);
if divisionnull~=0
Konvergenzkriterium=Bneu(1,1)/B(1,1);
else
Konvergenzkriterium=1;
end
B=Beobachtungswahrscheinlichkeit;

%Speicherung der neuen Parameter einer Strecke in der dafuer vorgesehen Datei
save va [A] [B] [H]
end

printf("\nInitiale Zustandsdichte\n");
printf("%.3f %.3f %.3f %.3f %.3f\n",H);
printf("\nZustandsuebergangsmatrix\n");
printf("%.3f %.3f %.3f %.3f %.3f\n",transpose(A));
printf("\nBeobachtungsmatrix\n");
printf("%.3f %.3f %.3f %.3f %.3f\n",transpose(B));

toc

```

## 17.2.2 Forward-Algorithmus

```

% ©Mario Armah, Hamburg, Deutschland, 2012, entwickelt im Rahmen der Abschlussarbeit Envidatec
GmbH
%Forward Algorithmus
%Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer gegebenen Beobachtungsfolge

function
[alpha,POQ,underflow]=forward(T,A,B,BeobachtungStrecke,InitialeZustandsdichte,AnzahlZustaende)

%Fuellen des Array zur spaeteren Addition
alpha(AnzahlZustaende,T)=0;
k=0;
%Verhinderung des Underflow der Wahrscheinlichkeiten,

```

```

%durch normalisieren auf die Kantenwahrscheinlichkeit
underflow(T)=0;

%Beginn des Forward Algorithmus
%Durchlaufen der Kanten, zur Bildung der Knotenwahrscheinlichkeiten,
%mit der zugehoerigen Beobachtung
for t=1:1:T

%Durchlaufen der Knoten, zur Bildung der Wahrscheinlichkeiten eines Zustandes
%und der zugehoerigen Beobachtung
    for j=1:AnzahlZustaende

%Initialisierung des Forward Algorithmus, Berechnung der Knoten aller Zustaende an der ersten
Kante,
%durch die erste Beobachtung und die Startwahrscheinlichkeiten
        if t==1
            alpha(j,t)=(InitialeZustandsdichte(j)*B(j,BeobachtungStrecke(t)));
        end
        %Induktion des Forward Algorithmus der Berechnung der Wahrscheinlichkeit
%aller Kanten, ausser der ersten
        if t>1
            for i=1:1:AnzahlZustaende
                %alpha(j,t)=(alpha(1,t-1)*A(1,j)+alpha(2,t-1)*A(2,j))*B(j,BeobachtungStrecke(t));
                alpha(j,t)=alpha(i,t-1)...
                    *A(i,j)...
                    *B(j,BeobachtungStrecke(t))...
                    +alpha(j,t);
            end
        end
        underflow(t)=alpha(j,t)+underflow(t);
    end
    alpha(:,t)=alpha(:,t)/underflow(t);
    j=j+1;
end

%Aufsummieren aller Knoten Wahrscheinlichkeiten zur Bestimmung
%der Wahrscheinlichkeit der Beobachtungsfolge
POQ=0;
for j=1:1:AnzahlZustaende
    POQ=alpha(j,t)+POQ;
end

```

end

### 17.2.3 Backward-Algorithmus

% ©Mario Armah, Hamburg, Deutschland, 2012, entwickelt im Rahmen der Abschlussarbeit Envidatec GmbH

%Backward Algorithmus

function [beta]=backward(T,A,B,BeobachtungStrecke,AnzahlZustaeude,underflow)

%Berechnung der Wahrscheinlichkeiten fuer den

%Backward-Algorithmus, der bedingte Wahrscheinlichkeit der Beobachtungen/

%Emissionen aus den energetischen Zuständen

%Terminierung

%Durchlaufender der einzelnen Kanten,

%zur Berechnung der Wahrscheinlichkeiten der jeweiligen Knoten

for t=1:1:T

%Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeit der Beobachtungen/

%Emissionen aus den energetischen Zuständen

for i=1:1:AnzahlZustaeude

%Initialisierung des Backward Algorithmus, Berechnung der Knoten aller Zustaeude an der ersten Kante

if t==1

beta(i,T)=1;

end

%Terminierung der bedingten Wahrscheinlichkeit der Beobachtungen/

%Emissionen aus den energetischen Zuständen

if t>1

for j=1:1:AnzahlZustaeude

beta(i,T-t+1)=A(i,j)...

\*B(j,BeobachtungStrecke(T-t+2))...

\*beta(j,T-t+2)...

+beta(i,T-t+1);

end

end

end

beta(:,T-t+1)=beta(:,T-t+1)/underflow(T-t+1);

end

## 17.2.4 Forward-Backward-Algorithmus

% ©Mario Armah, Hamburg, Deutschland, 2012, entwickelt im Rahmen der Abschlussarbeit Envidatec GmbH

%Kombination Forward-/Backward Algorithmus

%Zur Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten

%einer Zustandsfolge Q, der Wahrscheinlichkeit das dem energetischen Zustand q1 zum Zeitpunkt j,

%der energetische Zustand q2 zum Zeitpunkt j+1 folgt

function

[delta,gamma]=forwardbackward(T,A,B,BeobachtungStrecke,AnzahlZustaende,alpha,beta,POQ,Strecke,gamma,delta)

%Durchlaufen der Anzahl-1 der Emissionen zur Berechnung

%der Übergangswahrscheinlichkeiten der jeweiligen Kante

for t=1:1:T-1

%Berechnung Gamma der Übergangswahrscheinlichkeiten der Zustaende einer Zustandsfolge Q

for i=1:AnzahlZustaende

for j=1:AnzahlZustaende

gamma(Strecke,t,i,j)=alpha(i,t)...

\*A(i,j)...

\*beta(j,t+1)...

\*B(j,BeobachtungStrecke(t+1))...

/POQ;

end

end

end

delta(Strecke,T,AnzahlZustaende)=0;

for t=1:1:T

for i=1:AnzahlZustaende

for j=1:AnzahlZustaende

if t<T

delta(Strecke,t,i)=gamma(Strecke,t,i,j)+delta(Strecke,t,i);

else

delta(Strecke,t,i)=alpha(i,t)/POQ;

```

        end
    end
end
end

```

## 17.2.5 Evaluierung Forward-Backward-Algorithmus

```

% ©Mario Armah, Hamburg, Deutschland, 2012, entwickelt im Rahmen der Abschlussarbeit Envidatec
GmbH

```

```

%Evaluierung der Ergebnisse des Baum-Welche Algorithmus

```

```

function [Uebergangswahrscheinlichkeit,Beobachtungswahrscheinlichkeit,Startwahrscheinlichkeit]=...
evaluierung(T,delta,gamma,BeobachtungStrecke,AnzahlZustaende,AnzahlBeobachtungen,...
AnzahlStrecke,Streckenarray,Strecke)

```

```

%Berechnung der Initialen Zustandsdichten durch delta
%und Anzahl der jeweiligen Beobachtung
Startwahrscheinlichkeit(AnzahlZustaende)=0;

```

```

for i=1:1:AnzahlZustaende
    Startwahrscheinlichkeit(i)=sum(delta(:,1,i));
end

```

```

summeStartwahrscheinlichkeit=sum(Startwahrscheinlichkeit);

```

```

for i=1:1:AnzahlZustaende
    Startwahrscheinlichkeit(i)=Startwahrscheinlichkeit(i)/summeStartwahrscheinlichkeit;
end
%printf("%.3f %.3f %.3f %.3f %.3f\n",summeStartwahrscheinlichkeit);

```

```

%Berechnung von gamma, der Wahrscheinlichkeit wann ein Zustand i,
%in welchen energetischen Zustand j
%zum Zeitpunkt t+1 uebergeht

```

```

for i=1:1:AnzahlZustaende
    for j=1:1:AnzahlZustaende
        Uebergang(i,j)=sum(sum(gamma(:,i,j)));
    end
end

```

```

for i=1:1:AnzahlZustaende

```

```

summeUebergang(i)=sum(Uebergang(i,:));
end

for i=1:1:AnzahlZustaende
    for j=1:1:AnzahlZustaende
        Uebergangswahrscheinlichkeit(i,j)=Uebergang(i,j)/summeUebergang(i);
    end
end

%printf("%.3f %.3f %.3f %.3f %.3f\n",transpose(Uebergangswahrscheinlichkeit));

%Berechnung von Delta, der Wahrscheinlichkeit an welcher Stelle einer Route,
%welcher energetische Zustand auftritt
%Fuer die Wahrscheinlichkeit der letzten Knoten erfolgt die Berechnung durch teilen der Knoten-
Wahrscheinlichkeit
%einer gegebenen Beobachtungsfolge durch die Gesamtwahrscheinlichkeit der Beobachtungsfolge

%neue Wahrscheinlichkeiten Beobachtungsmatrix
Beobachtung(AnzahlBeobachtungen,AnzahlBeobachtungen)=0;
summe(AnzahlBeobachtungen)=0;
summeZustand=0;
summeBeobachtungswahrscheinlichkeit(AnzahlZustaende)=0;
Beobachtungsmatrix(AnzahlZustaende,AnzahlBeobachtungen)=0;

for Strecke=1:1:AnzahlStrecke
    for j=1:1:AnzahlBeobachtungen
        BeobachtungStrecke=[Streckenarray{[Strecke]};
            BeobachtungOrt=find(BeobachtungStrecke==j);
            gefundeneBeobachtungen(Strecke,j)=[length(BeobachtungOrt)];
            for t=1:1:gefundeneBeobachtungen(Strecke,j)
                BeobachtungOrtArray(Strecke,t,j)=[BeobachtungOrt(t)];
            end
        end
    end
end

for Strecke=1:1:AnzahlStrecke
    for i=1:1:AnzahlZustaende
        for j=1:1:AnzahlBeobachtungen
            for t=1:1:gefundeneBeobachtungen(Strecke,j)

```

```
Beobachtung(i,j)=delta(Strecke,BeobachtungOrtArray(Strecke,t,j),i)+Beobachtung(i,j);
    summe(i)=delta(Strecke,BeobachtungOrtArray(Strecke,t,j),i)+summe(i);
    %printf("B%.6f sum%.6f\n",Beobachtung(i,j),summe(i));
end
end
end
end

for i=1:1:AnzahlBeobachtungen
    Beobachtungswahrscheinlichkeit(i,:)=Beobachtung(i,:)/summe(i);
end
```