

Optimierung des Treibstoffverbrauchs und Simulation des Betriebs von RoRo-Schiffen auf Routen mit geringen Wassertiefen

Optimization of the Fuel Consumption and Simulation of the Operation of RoRo Vessels on Routes in Shallow Water Regions

B. Friedhoff – Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme Duisburg

Summary Modern RoRo ships operate according to strict schedules on fixed routes. A shipyard, which designs an economic vessel for a reasonable price, has to take the environmental factors which might cause a delay into account at an early design stage. To quantify a vessel's later schedule-keeping ability, the operation of the vessel is simulated on the basis of 300 GB temporally and spatially resolved hindcast data.

Amongst the effects of wind, waves and tidal currents, local water depth provides significant potential for energy savings. To determine a reasonable, depth-adapted speed profile for the simulation, the most economical profile is determined in an optimization by means of a genetic algorithm according to the influence of the water depth. The results gained by this simulation are helpful when dimensioning the propulsion plant and provide additional information for the shipowner and shipyard.

Zusammenfassung Moderne RoRo-Schiffe fahren nach einem festen Fahrplan auf vorgegebenen Routen. Eine Werft, die ein hierfür optimiertes Schiff anbieten möchte, muss bereits im Entwurf die Umwelteinflüsse, die zu Verspätungen führen können, berücksichtigen. Zur Quantifizierung der Fahrplanteue wird der Schiffsbetrieb unter Verwendung von 300 Gigabyte zeitlich und räumlich aufgelöster Umgebungsbedingungen simuliert und statistisch ausgewertet. Die gewonnenen Ergebnisse ermöglichen eine bessere Dimensionierung der Antriebsanlage und liefern zahlreiche weitere Informationen für Werft und Reederei.

Neben den zeitlich veränderlichen Umwelteinflüssen wie Wind, Seegang und Tidenstrom birgt besonders die Wassertiefe ein bemerkenswertes Potential zur Einsparung wertvollen Treibstoffes. Im Rahmen einer Diplomarbeit, welche bei der *Flensburger Schiffbau Gesellschaft* entstand, wurde mit Hilfe einer genetischen Optimierung eine an das Wassertiefenprofil angepasste Geschwindigkeitsverteilung ermittelt. Dieses Fahrprofil wird anschließend der Simulation zugrunde gelegt.

1 Umgebungsbedingungen

Die Simulation des Schiffsbetriebs wird mit Hilfe von räumlich und zeitlich aufgelösten Werten insgesamt 17 verschiedener Umweltparameter durchgeführt. Diese Daten stammen aus Nachrechnungen von Klimaprozessen, welche in dem EU-Vorhaben HIPOCAS (Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe) unter anderem vom GKSS-Forschungszentrum durchgeführt wurden, und liegen für das Gebiet der südlichen Nordsee vor. Bei einer räumlichen Auflösung von etwa 5 Kilometern in Breiten- und Längenrichtung sind die Daten für den Zeitraum von 1958 bis 2000 stundenweise in einer Datenbank abgelegt. Daraus ergibt sich ein Datenvolumen von mehr als 300 Gigabyte.

Die Verwendung von Wind- und Seegangsda-

ten aus so genannten Scatter-Diagrammen¹ ist nicht zufriedenstellend. Solche Statistiken liegen zwar für nahezu sämtliche Seegebiete weltweit vor und nehmen nur geringen Speicherplatz in Anspruch, jedoch gehen durch die Aufbereitung der Daten die Übergangswahrscheinlichkeiten der Bedingungen in zeitlich und räumlich benachbarten Punkten verloren. Da aber im Laufe jeder simulierten Reise wiederholt aktualisierte Wetterdaten herangezogen werden müssen, könnten die Abläufe des Wettergeschehens somit nicht realistisch nachgebildet werden. Anstelle des tatsächlichen Änderungsverhaltens der Wetterverhältnisse müssten empirische Modelle eingesetzt werden, deren Genauigkeit relativ unsicher ist. Daher wurde hier der

¹Statistische Daten über die Wahrscheinlichkeit z.B. bestimmter Wellenhöhen und -perioden bei verschiedenen Windrichtungen

Mehraufwand durch die Verwaltung großer Datenmengen in Kauf genommen.

2 Routenbeschreibung

Die untersuchten Routen werden durch die geographischen Koordinaten von Wegepunkten, an denen signifikante Kurswechsel stattfinden, beschrieben. Zwischen diesen Punkten verläuft die Route geradlinig bzw. entlang von so genannten Großkreisen oder Orthodromen. Ein Großkreis ist die Schnittlinie einer durch den Erdmittelpunkt und zwei Wegepunkte verlaufenden Ebene mit der Erdoberfläche. Das Segment eines solchen Kreisbogens stellt die kürzestmögliche Verbindung zwischen zwei Punkten auf einer Kugeloberfläche dar. Im Gegensatz zur Navigation entlang von Loxodromen, i.e. geradlinige Verbindung der Punkte in der Mercator-Projektion mit konstanten Meridian-Schnittwinkeln, ändert sich bei der Großkreisnavigation der zu steuernde Kurswinkel stetig.

Im Laufe der Simulation werden an einer frei wählbaren Anzahl ortsfester Punkte die berücksichtigten Wetterdaten aktualisiert. Jedem dieser Punkte wird ein ihn umgebender Streckenabschnitt mit gleichbleibender Wassertiefe und konstantem Kurs zugeordnet.

3 Flachwassereinfluss

Eine verringerte Wassertiefe bewirkt durch Beeinflussung des Wellensystems und der Schiffsumströmung eine Steigerung des Leistungsbedarfs, welcher zum Erreichen einer vorgegebenen Geschwindigkeit benötigt wird. Analog kann mit konstanter Leistung bei einer beschränkten Wassertiefe nur noch eine reduzierte Geschwindigkeit erreicht werden. In Abhängigkeit von der Schiffsgeschwindigkeit beginnt dieser Einfluss bereits bei Wassertiefen von rund 40 Metern. Somit müssen große Teile der Nordsee, aber auch fast die gesamte Ostsee als Flachwasser bezeichnet werden.

Die Berechnung der Leistungskurven bei verschiedenen Wassertiefen erfolgt mit Hilfe der Methode der Effektivgeschwindigkeit. Dieses Verfahren wurde am Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme (DST) von Jiang entwickelt. Da eine Berücksichtigung aller in der Datenbank entlang einer Route vorkommenden Wassertiefen zu aufwändig wäre, arbeitet das Programm mit einer anwendergestützten Diskretisierung der Wassertiefen. So

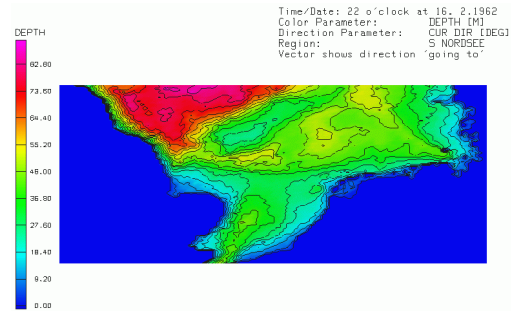


Abb. 1: Visualisierung der Wassertiefen im Bereich der südlichen Nordsee

kann bei geringem Genauigkeitsverlust mit abschnittsweise konstanten Wassertiefen gearbeitet werden. Auf Streckenabschnitten mit geringer Tiefenänderung oder mit geringem Einfluss durch eine relativ große Wassertiefe genügt eine grobe Einteilung. Dies verringert zum einen den Speicher- und Rechenaufwand der Simulation erheblich und ermöglicht zum anderen die nachstehend beschriebene Optimierung des Geschwindigkeitsprofils durch eine reduzierte Anzahl der Freiheitsgrade.

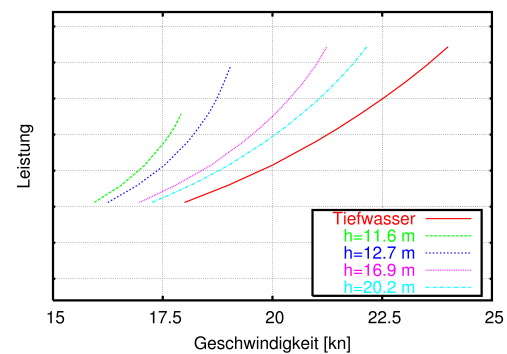


Abb. 2: Abhängigkeit der erforderlichen Antriebsleistung von der Wassertiefe

4 Fahrprofile

Im Laufe der Simulation müssen bei verschiedenen Wassertiefen möglichst realistische Fahrtzustände berücksichtigt werden. Hierzu wurden verschiedene so genannte Fahrprofile implementiert und untersucht.

Das einfachste Fahrprofil ist die Vorgabe einer konstanten Geschwindigkeit, sofern diese mit der installierten Antriebsleistung bei gegebener Wassertiefe zu erreichen ist. Dieses Profil berücksichtigt den vorgegebenen Fahrplan durch eine gleichbleibende Reisedauer, solan-

ge die Wetterbedingungen nicht zu einer unvermeidbaren Geschwindigkeitsreduktion führen. Allerdings führt die wassertiefenunabhängige Geschwindigkeitsvorgabe in flachen Routenabschnitten zu sehr hohen Anforderungen an die Antriebsanlage, so dass für die zusätzliche Berücksichtigung der Einflüsse von Wind und Seegang nur noch geringe Reserven zur Verfügung stehen. Zudem resultiert aus diesen hohen Geschwindigkeiten im Flachwasser ein erheblicher Anstieg des Treibstoffverbrauchs.

Als zweites Fahrprofil wurde die Vorgabe einer konstanten Leistung eingesetzt. Dieses Profil resultiert zwar in einer plausiblen Geschwindigkeitsreduktion in flachem Wasser, jedoch auch in einer sehr starken Streuung der Reisedauer. Minimale Einflüsse durch Wind und Seegang führen so bereits zu einer unrealistischen Verschiebung der Ankunftszeit.

Die Vorteile der beiden beschriebenen Profile können jedoch durch die Vorgabe abschnittsweise konstanter und wassertiefenabhängiger Geschwindigkeiten verbunden werden. Genauere Untersuchungen ergaben, dass das Geschwindigkeitsprofil, welches sich bei konstanter Leistung einstellt, noch nicht das Optimum darstellt. Eine zusätzliche Fahrtreduktion bei geringen Wassertiefen, welche in tieferem Wasser durch entsprechend größere Geschwindigkeiten ausgeglichen wird, führt zu weiteren Einsparungen im Kraftstoffverbrauch.

Zur Ermittlung der Geschwindigkeitsverteilung entlang der Route mit dem geringsten Treibstoffbedarf wird zur Vorbereitung der eigentlichen Simulation eine Optimierung durchgeführt. Das Ergebnis steht anschließend als drittes Fahrprofil für die Simulation zur Verfügung.

5 Optimierung

Zur Optimierung des Geschwindigkeitsprofils wird die oben beschriebene Diskretisierung der Route anhand der Wassertiefe verwendet. Die zeitabhängigen Parameter, wie Wind, Seegang und Strom, bleiben unberücksichtigt. Als Stellgrößen dienen die abschnittsweise für jede diskretisierte Wassertiefe konstanten Geschwindigkeiten. Die zu minimierende Zielfunktion ist der summierte Treibstoffbedarf für eine vollendete Reise. Als Randbedingung muss eine vorgegebene Reisedauer eingehalten werden. Zusätzlich darf in keinem Routenabschnitt die Geschwindigkeit bzw. der damit verbundene

Leistungsbedarf außerhalb der entsprechenden Grenzen des untersuchten Schiffes liegen.

Die Optimierung erfolgt in Anlehnung an die Evolutionstheorie nach einem so genannten genetischen Algorithmus. Zunächst wird eine beliebige Einzellösung, die alle Randbedingungen erfüllt, ermittelt. Daraufhin wird eine zufällig gewählte Population von beispielsweise vierzig plausiblen Einzellösungen generiert. Auf dieser Population basierend wird in jedem Schleifendurchlauf, sozusagen für jede Generation, durch zwei verschiedene Mutationsmechanismen eine dreimal so große Zwischenpopulation generiert.

Der erste Mechanismus verändert die Gene der vorherigen Population nach dem Glättungsprinzip. So werden Elemente mit extremen Geschwindigkeiten auf einzelnen Abschnitten zügig zu plausiblen Lösungen weiterentwickelt. Der zweite Mechanismus mutiert zufallsbasiert, aber nutzt das Prinzip einer anderen Optimierungsmethodik. Mit fortschreitender Verbesserung der Lösungen wird die maximale Sprungweite der zur Mutation vorgenommenen Geschwindigkeitsänderungen herabgesetzt. Dies entspricht der fiktiven Temperatur der so genannten Simulated Annealing Algorithmen, welche sich an dem Modellbild des Erstarrungsprozesses eines Kristalls, bei dem sich ein optimaler Energiezustand einstellt, orientieren.

Für jede der enthaltenen Einzellösungen wird die Zielfunktion ausgewertet und das Drittel mit den günstigsten Treibstoffverbräuchen für die folgende Generation verwendet. Verbessert sich der geringste Verbrauch über eine einstellbare Anzahl von Durchläufen nicht weiter, so wird der Vorgang beendet und das günstigste Ergebnis ausgegeben.

Zur Anpassung der Optimierung an die Anzahl der Freiheitsgrade oder die Randbedingungen der Hardware, sind die Populationsgröße, der Temperaturgradient sowie die maximal zulässige Anzahl von Iterationen ohne Verbesserung frei einstellbar.

6 Simulation

Die Computersimulation des Liniendienstes von RoRo-Schiffen auf vorgegebenen Routen wird mit einer Vielzahl von Parametern kontrolliert. So kann wahlweise innerhalb der 43 Jahre der Zeitraum zwischen einer beliebigen Start- und einer Endstunde simuliert werden, oder der An-

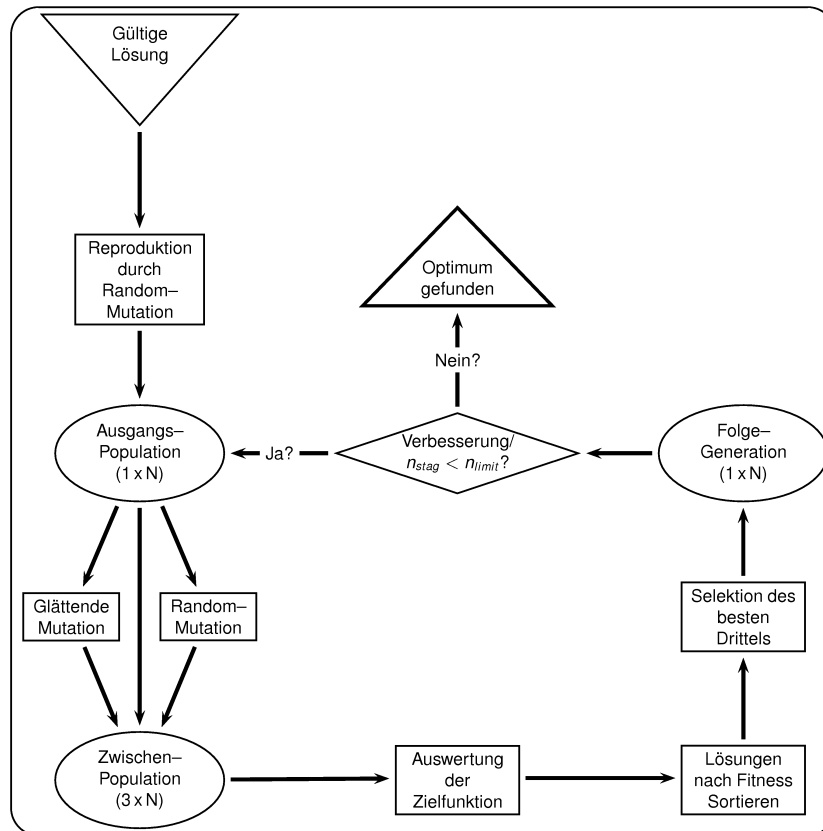


Abb. 3: Flussdiagramm des Optimierungsvorgangs

wender wählt einen periodisch wiederkehrenden Zeitraum aus. Letzteres eignet sich beispielsweise für die Untersuchung ausgewählter Wintermonate mit besonders schwierigen Wetterbedingungen. Innerhalb des gewählten Zeitrahmens können vollständige Rundreisen oder ausschließlich Hin- oder Rückreisen simuliert werden. Auch die Vorgabe fester Tageszeiten für die Abreise oder einzuhaltender Pausen zur Berücksichtigung von Umschlagzeiten ist möglich. Desweiteren können zahlreiche Koeffizienten zur Beschreibung der Antriebsanlage oder zur Auswertung der Einflüsse von Wind und Seegang an die speziellen Bedingungen des untersuchten Schiffsentwurfs angepasst werden.

Zusätzlich zu den genannten Parametern können im Vorfeld auch einige Einstellungen für die Auswertung der Simulation vorgenommen werden. So kann der Anwender die für die Analyse relevanten Größen aus der nachstehenden Liste auswählen. Jeder auftretende Wert eines auszuwertenden Parameters wird in Klassen mit zuvor automatisch oder manuell gesetzten Grenzwerten als Zählung registriert. Nicht gewählte Parameter werden selbstverständlich weiterhin in der Simulation berücksichtigt. Le-

diglich auf eine Klassierung und Ausgabe der Ergebnisse wird gegebenenfalls verzichtet. Für die Auswertung am Ende jeder Reise sind folgende Parameter wählbar:

Reisedauer Zur Quantifizierung der Verspätungen wird für jede simulierte Reise die benötigte Zeitdauer ausgewertet.

Treibstoffverbrauch Für eine detaillierte Prognose der zu erwartenden Betriebskosten wird der summierte Treibstoffverbrauch jeder Reise klassiert.

Distanz Während die zurückgelegte Distanz über Grund bei fest vorgegebenen Wegpunkten konstant ist, variiert die durch das Wasser zu fahrende Distanz in Folge des Oberflächenstroms.

Im Verlauf jeder Reise können, sofern gewünscht, die nachstehenden weiteren Größen klassiert und in die Ausgabedatei eingetragen werden:

- Leistungsbedarf
- Schiffsgeschwindigkeit

- Tiefen-Froudezahl
- Signifikante Wellenhöhe
- Wellenperiode
- Wellenbegegnungswinkel
- Zusatzwiderstand durch Seegang
- Windgeschwindigkeit
- Windeinfallswinkel
- Zusatzwiderstand durch Wind
- Geschwindigkeit des Oberflächenstroms
- „Einfallswinkel“ des Stroms

7 Ergebnisse

Die Ergebnisse sind hier exemplarisch für die 332 nautische Meilen lange Rundreise eines 200 m-RoRo-Schiffes zwischen Zeebrügge in Belgien und Immingham in Großbritannien dargestellt. Die Lösung der Optimierung ist ein Profil abschnittsweise konstanter, an die jeweiligen Wassertiefen angepasster Geschwindigkeiten. Setzt man für die oben genannte Rundreise eine Reisedauer von sechzehn Stunden an, so liegt der ermittelte Verbrauch bei den als optimierten Geschwindigkeiten bei 38,6 t Schweröl je Reise. Im Vergleich dazu benötigt dasselbe Schiff bei unangepasster Geschwindigkeit über allen auftretenden Wassertiefen 41,8 t. Selbst bei konstanter Bremsleistung und somit verringerten Flachwassergeschwindigkeiten liegt der Verbrauch noch bei 40,6 t. Bei Annahme eines Schwerölpreises von etwa 160 € je Tonne ergibt sich ein Sparpotential von bis zu 200.000 € jährlich für ein einziges Schiff.

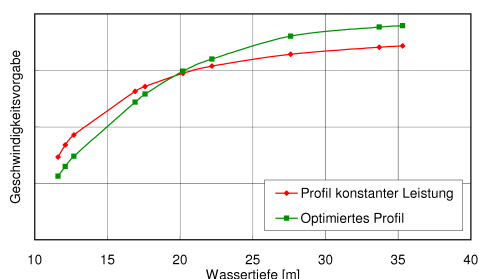


Abb. 4: Vergleich der Geschwindigkeiten aus der Optimierung mit dem Fahrprofil konstanter Leistung

Die Geschwindigkeit der Optimierung ist deutlich besser als anfänglich erwartet. Obwohl mehrere hunderttausend Einzellösungen untersucht werden, liegt das Ergebnis für die

Beispielroute mit etwa zwanzig Abschnitten je nach Einstellung der Optimierungsparameter bereits nach ein bis zwei Minuten vor. Selbst eine Erhöhung der Freiheitsgrade auf sechzig Routenabschnitte liefert noch in weniger als einer halben Stunde Rechenzeit ein zufriedenstellendes Ergebnis. Somit eignet sich dieses Verfahren auch für den laufend aktualisierten Einsatz an Bord. Das resultierende Profil der Bremsleistungen über den diskretisierten Wassertiefen zeigt deutlich den mit wachsender Tiefe abklingenden Flachwasser-Einfluss auf das optimierte Profil.

Am Ende einer Simulation werden die Ergebnisse in einer Ausgabedatei zusammengefasst. Dieser Datei lässt sich beispielsweise entnehmen, dass das untersuchte Schiff in zehn Jahren etwa 7% der Reisen verspätet beendet. Diese Verspätung beträgt jedoch nur in 0.5% der Fälle mehr als dreißig Minuten. Die ebenfalls gewonnenen statistischen Lastprofile der Antriebsanlage können von den jeweiligen Zulieferern zur Auslegung einzelner Komponenten verwendet werden. Die Daten über die verschiedenen Wind- und Seegangparameter ermöglichen eine weitere Optimierung des Schiffsentwurfs hinsichtlich der zu erwartenden Einsatzbedingungen.

Der summierte Verbrauch für 3.650 Reisen eines Simulationszeitraums von zehn Jahren liegt etwa 9% über dem Verbrauch des optimierten Wertes in ideal ruhigem Wetter. Diese Differenz entspricht dem gemittelten zusätzlichen Leistungsbedarf in Folge von Wind, Seegang und Strom.

Die hier vorgestellte Methodik liefert vielfältig einsetzbare Ergebnisse für den Schiffsbetrieb auf offener See. Die so genannte Reivierfahrt mit ihren komplexen Einflussfaktoren, aber auch Hafenmanöver können mit heutigen Mitteln nur unzureichend simuliert werden. Die Ausweitung der Methodik auf diese Bereiche ist Bestandteil zukünftiger Projekte des Instituts für Schiffstechnik und Transportsysteme, der FSG und ihrer Forschungspartner.

Literatur

- [1] Birk, L.; Harries, S. (Herausgeber): *OPTIMISTIC – Optimization in Marine Design*, 39th WEGEMT Summer School, Verlag Mensch & Buch Berlin 2003

- [2] Dallinga, R.; van Daalen, E.; Grin, R.; Wil-
lenstein, T.:
*Scenaria Simulations in Design for Ser-
vice*,
9th Symposium on Practical Design of
Ships and Other Floating Structures
Luebeck-Travemuende, Germany, 2004
Computer Science Department, Colorado
State University, 1993
- [3] Friedhoff, B.:
*Entwicklung und Implementierung von Re-
chenverfahren zur Bewertung von Ro-
Ro-Schiffen unter Berücksichtigung von
Fahrprofilen sowie der Einflüsse von Wind
und Seegang hinsichtlich ihrer Fahrplan-
treue*,
Institut für Schiffstechnik und Transport-
systeme, Bericht Nummer 007/2005
- [4] Hellström, T.:
*Optimizing Control at Sea: The Experi-
ence of the Seapacer Project*,
Department of Computing Science, Umeå
University–Sweden, 2002,
ISSN-0348-0542
- [5] Jiang, T.; List, S.; Lochte-Holtgreven, H.:
*Widerstandsprognose für Schiffe auf fla-
chem Wasser*,
VBD-Bericht 1532, 2001
- [6] Jiang, T.; Friedhoff, B.:
*On the Conversion of Resistance and Pro-
pulsion Quantities from One Water Depth
to another One*,
Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesell-
schaft, 2003
- [7] Mitchell, M.:
An Introduction to Genetic Algorithms,
MIT Press, Fifth printing, 1999
- [8] Soares, C.G.; Carretero, J.C.; Weiße, R.;
Alvarez, E.:
*A 40 Years Hindcast of Wind, Sea Level
and Waves in European Waters*,
Proceedings of the 21st Int. Conference
on Offshore Mechanics and Arctic Engi-
neering, Oslo 2002
- [9] Weiße, R.; Feser, F.; Günther, H.:
*Wind- und Seegangsklimatologie 1958–
2001 für die südliche Nordsee basierend
auf Modellrechnungen*,
GKSS Bericht 2003,10
- [10] Whitley, D.:
A Genetic Algorithm Tutorial,