

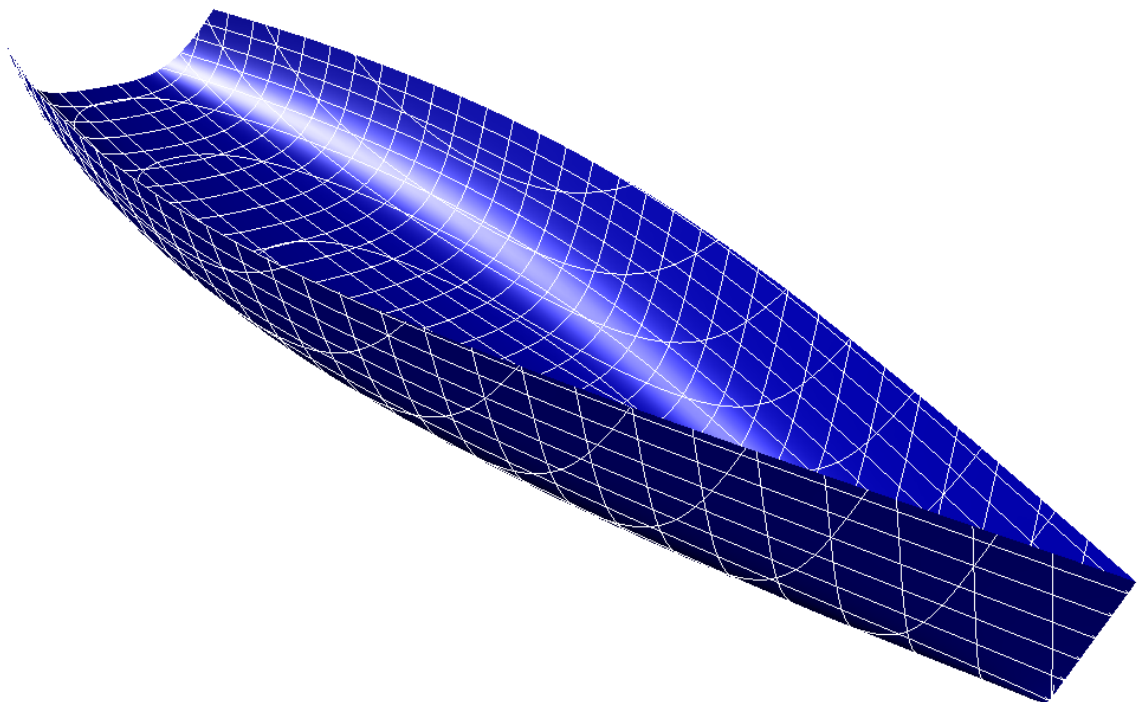
Vortrag im Rahmen des 22. Symposiums Yachtbau und
Yachtkonstruktion

Effiziente Geometrieerzeugung im modernen Yachtentwurf

Efficient Geometric Modeling in Modern Yacht Design

Claus Abt*** Stefan Harries*** Karsten Hochkirch* **

Hamburg, den 02.11.2001



* FRIENDSHIP-Systems GbR, Kantstraße 100, 10627 Berlin, GERMANY,
<http://www.FRIENDSHIP-Systems.com>, <mailto:info@FRIENDSHIP-Systems.com>

** Technische Universität Berlin, Institut für Land- und Seeverkehr

Abstract

Der Entwurf und die Konstruktion von Yachten werden heute weitgehend mittels rechnergestützter Systeme durchgeführt. Für allgemeine Modellieraufgaben stehen bereits gute CAD¹-Systeme zur Verfügung. Diese traditionellen Systeme orientieren sich jedoch stark an der Mathematik der implementierten Geometrieelemente. Für den Rumpfwurf – eine Aufgabe mit zentraler Bedeutung im Yachtdesign – wurde daher ein neues Verfahren zur effizienten Geometrieerzeugung entwickelt. Dieses Verfahren verfolgt eine andere Entwurfsphilosophie als die traditionellen Systeme: die Geometrie wird mit Hilfe wichtiger Formparameter (d.h. charakteristische Eigenschaften des Rumpfs) beschrieben und anschließend automatisch bestimmt, wobei alle Formen hinsichtlich ihrer Glätte optimal sind.

In diesem Beitrag werden sowohl die traditionellen Methoden der rechnergestützten Geometriemodellierung als auch die neuen parametrischen Verfahren besprochen. Dabei werden einerseits die Grundlagen der parametrischen Modellierung diskutiert und andererseits das hierauf basierende System FRIENDSHIP-Yacht vorgestellt. Anhand ausgewählter Beispiele wird das parametrische Modellieren mittels FRIENDSHIP-Yacht illustriert. Abschließend folgt eine kurze Diskussion zur automatisierten Rumpfoptimierung nach hydrodynamischen Kriterien.

Today, yachts and ships are widely designed with advanced modeling systems. Good CAD-tools (Computer Aided Design) are available for the generic tasks of shape generation. The traditional techniques, however, are often closely based on the mathematics of the implemented design elements. A new approach has been developed for the efficient modeling of hull forms. Hull form generation being a central part in the design, this new approach introduces a different modeling philosophy: the geometry is defined in terms of important form parameters (i.e., shape characteristics) and determined automatically such that the desired parameters are fulfilled and the shapes are excellent with regard to fairness.

In this paper both the traditional and the parametric modeling techniques are discussed. Parametric modeling is presented from a general point of view as well as in the light of a new CAD-system called FRIENDSHIP-Yacht. Selected examples produced with the FRIENDSHIP-Yacht are given to illustrate the applicability and the merit of parametric modeling as an effective design tool. A brief outlook is given on automated optimization of hulls in respect to hydrodynamic criteria.

¹CAD – Computer Aided Design

1 Einleitung

Im Yachtentwurf werden seit Anfang der achtziger Jahre CAD-Systeme zur rechnergestützten Modellierung von Rümpfen eingesetzt, siehe z.B. LETCHER (1981). Bei der Klassifikation von Modellierverfahren kann zwischen Systemen zur Formgenerierung des Rumpfes (Linienriss) und Systemen zur Erstellung von Fertigungszeichnungen unterschieden werden. Die Festlegung der Form des Rumpfes geschieht zu einem sehr frühen Zeitpunkt, zu dem der Entwurf noch viele Unbekannte besitzt. Die Gewichtsverteilung, die Aufteilung der Räume und ggf. die Positionierung struktureller Elemente haben sich der Form des Rumpfes in weiten Teilen anzupassen. Die Festlegung der Rumpfform, gemeinsam mit einer Hand voll weiterer Parameter, ist ausschlaggebend für die Eigenschaften auf dem Wasser und daher die (fast) alles entscheidende Handlung im Entwurfsprozess, die die hydrodynamische Qualität einer Yacht bestimmt.

In der Regel wird die äußere Form der Yacht – insbesondere die des Rumpfes – mit einem 3D CAD Programm modelliert, für die weitere Bearbeitung der Fertigungszeichnungen jedoch in 2D Programme überführt. Eine vollständige dreidimensionale Modellierung aller konstruktiven Elemente und Einbauten ist im Yachtbau nicht üblich, da die ästhetischen Anforderungen keine Modellierung mit Regelkörpern oder -flächen zulassen. Die Formen unter, wie auch über Deck sind nicht durch gerade Kanten oder konstante Radien gekennzeichnet, sie orientieren sich an der Form des Rumpfes. Dies kann im Dreidimensionalen nur durch den Einsatz aufwendiger Modellierverfahren realisiert werden – und hat bisher keinen flächendeckenden Einzug in die Konstruktionsbüros gehalten. Die Änderung der Rumpfform zu einem Zeitpunkt, zu dem bereits strukturelle Elemente wie Schotten, Steifen und Interieur entworfen sind, zieht in der Regel – abhängig von der Größe der Änderung – einen immensen Arbeitsaufwand nach sich.

Je durchdachter der Entwurf des Rumpfes, je mehr Varianten untersucht werden können, die den Anforderungen an Ästhetik, Raumbedarf, Gewichtsverteilung und hydrodynamisch relevanten Parametern entsprechen, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Rumpf zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal modifiziert werden muss.

Neben empirischen Verfahren zur Bestimmung der Leistung einer Yacht unter Segeln (VPP²) oder unter Motor (z.B. HOLTROP UND MENNEN (1982); HOLTROP (1984) für Verdränger, SAVITSKY (1964) für Gleiter), werden zunehmend numerische Simulationsprogramme (CFD³) eingesetzt, die Aussagen über die Güte einer Rumpfform zulassen. Die Möglichkeit, Computerprogramme zur Bewertung der Qualität eines Rumpfes einzusetzen, eröffnet dem Entwerfenden ganz neue Möglichkeiten: die systematische Optimierung des Rumpfes.

²VPP – Velocity Prediction Program

³CFD – Computational Fluid Dynamics

Durch gezielte Veränderung einzelner Parameter der Form, z.B. die Lage des Verdrängungsschwerpunktes, eine lokale Aufkimmung oder die Lage der maximalen Breite, können Trends erkannt und auf optimale Lösungen geschlossen werden – vorausgesetzt, der Entwerfer ist in der Lage in der zur Verfügung stehenden Zeit ausreichend viele Entwürfe zu erzeugen, die den Erfordernissen an Ästhetik, Raumangebot etc. genügen.

Die gängigen CAD-Systeme, die im Yachtentwurf eingesetzt werden, arbeiten auf der sehr niedrigen Ebene der mathematischen Beschreibung von Flächen, Kurven und Körpern im Raum. Neben den weit verbreiteten NURBS⁴-Flächen als Beschreibungsformat, gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Darstellungen, die je nach Problemstellung eingesetzt werden können und dem Entwerfer die Arbeit erleichtern. Eine Eigenschaft haben alle Systeme jedoch gemeinsam: die Parameter der Geometriedarstellung stehen in keinem semantischen Zusammenhang mit dem Produkt, also der Yacht. Weder die Glätte einer in Stromlinienrichtung verlaufenden Kurve, noch die Kontrolle, ob die Flächenbeschreibung überhaupt einen *dichten* Rumpf darstellt, sind Bestandteil dieser CAD-Systeme. Als Folge dieser Problematik wird von den Anwendern solcher Programme ein großes Maß an Fachwissen abverlangt. Nicht etwa Fachwissen bezüglich der zu entwerfenden Yacht, sondern Fachwissen über die mathematischen Verfahren der CAD-Programme, mit denen er oder sie arbeitet. Für die Erzeugung systematischer Familien, also Variationen bestimmter Parameter eines Yachttyps, bedeutet die Verwendung dieser Programme einen sehr großen Arbeitsaufwand. Für eine formale, d.h. automatisierte Optimierung, eignen sie sich gar nicht, da immer mehrere Parameter fein abgestimmt verändert werden müssen und die Form der mathematischen Darstellung keine brauchbaren Rümpfe gewährleistet.

Die Autoren haben sich in den vorangegangenen Jahren intensiv mit der parametrischen Modellierung und der formalen Optimierung von Schiffsförmern auseinandergesetzt. Die CAD-Programme, die sie zur parametrischen Modellierung von Schiffen entwickelt und erstmals erfolgreich in einer vollautomatischen Optimierung für die Verbesserung von Rumpfförmern angewandt haben, wurden von ihnen für den Entwurf von Segelyachten erweitert. Die Verwendung der hier vorgestellten parametrischen Methoden ermöglicht es, innerhalb von wenigen Minuten vollständig ausgestrakte Yachtrümpfe zu modellieren, die z.B. über eine vorgegebene Verdrängung oder andere hydrodynamisch relevante Eigenschaften verfügen.

Im folgenden werden konventionelle Methoden zur Rumpfmodellierung vorgestellt, denen anschließend die von den Autoren entwickelten parametrischen Methoden gegenübergestellt werden. In einem Beispiel werden in dem dann folgenden Abschnitt die Möglichkeiten der schnellen Erzeugung von Linienrissen demonstriert. Abschließend wird ein Ausblick auf die Anwendung für den automatisierten Entwurf von Yachtrümpfen gegeben.

⁴NURBS – Non-Uniform Rational B-Spline

2 Konventionelles Modellieren

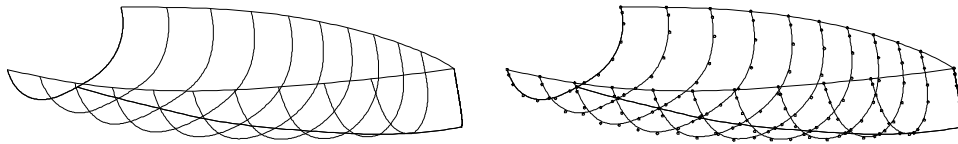


Bild 1: Dreidimensionale Darstellung eines Rumpfes durch Spanten und Stützpunkte

Im Gegensatz zur plastischen Formgebung eines Modells, z.B. aus Holz, Hartschaum oder Ton, stellt die Modellierung von Freiformflächen in einem CAD-Programm Anwender und die Entwickler solcher Programme vor einige Probleme. Alleine die Betrachtung eines 3D-Objektes auf einem ebenen Bildschirm ist nur durch eine Vielzahl von Hilfsmitteln möglich. Das Ausblenden verdeckter Kanten, realistische Renderings, beleuchtet aus verschiedenen Richtungen oder als Drahtmodell in perspektivischer Ansicht sind einige der Möglichkeiten, dem Anwender einen dreidimensionalen Eindruck zu vermitteln. Die Beurteilung der Eigenschaften einer Freiformfläche im Computer ist notwendig, jedoch schwierig und in der Regel nicht Bestandteil der kreativen Arbeit des Entwurfs, sondern eine durch *handwerkliches* Geschick zu erfüllende Voraussetzung. Für eine gezielte Manipulation, wenn das zu modellierende Produkt neben ästhetischen auch formale Kriterien erfüllen muss, sind die Methoden der meisten CAD-Systeme nur bedingt geeignet. Dadurch, dass Rumpfe in ihrer mathematischen Darstellung in der Regel durch ein Vielzahl von Raumkoordinaten definiert werden (Bild 1), ist die gezielte Manipulation sehr aufwendig (Bild 2). Das Verschieben einzelner Stützstellen einer NURBS-Fläche im Raum erfordert vom Entwerfer viel Übung, wenn er oder sie eine Fläche modellieren will, die glatt ist und z.B. ein gewünschtes Volumen umschließt.

In der Regel werden Eigenschaften, wie die eines Rumpfes, auf von der Fläche abgeleitete Größen zurückgeführt:

- Verläufe ebener Schnitte,
- Werte integraler Größen und
- Krümmungsverläufe der Fläche

Dies sind typische qualitative und quantitative Merkmale, nach denen die Geometrie eines Rumpfes bewertet wird. Für den Yachtkonstrukteur stellen sich diese Eigenschaften z.B. als Wasserlinien, Spanten, Schnitte, Verdrängung oder auch den Krümmungsverlauf einer Isoparameterlinie dar, wie z.B. in der Porcupine (Stachelschwein)-Darstellung einer NURBS-Fläche unter Fastship⁵ (Bild 3). Moderne CAD-Systeme verfügen darüber hinaus über Analysewerk-

⁵Fastship – Proteus Engineering, 345 Pier One Road Suite 200, Stevensville, MD 21666, USA

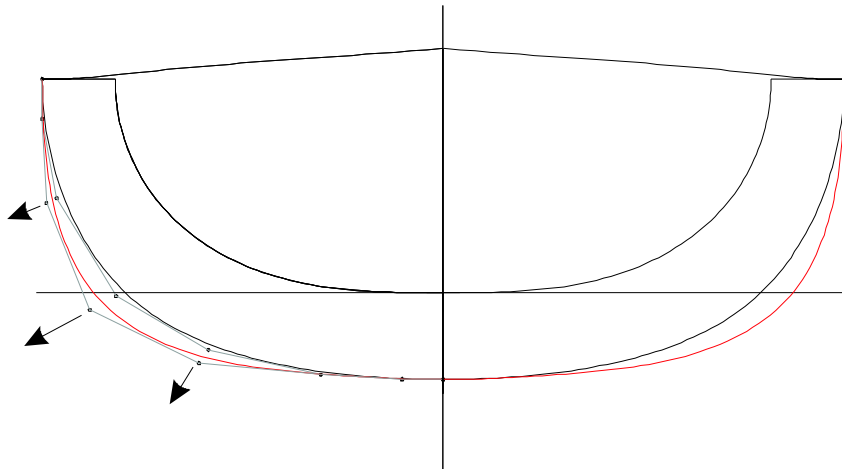


Bild 2: Manuelles Manipulieren der Rumpfgeometrie durch Verschieben einzelner Stützpunkte

zeuge, die die Krümmung einer Fläche durch Falschfarben dokumentieren und dem Entwerfenden eine Hilfe in der iterativen Arbeit des Glättens sind. In den Bildern 4 und 5 wird der Krümmungsverlauf in einer ausgewählten Parameterrichtung für eine Segelyacht und die Gleitfläche einer Motoryacht gezeigt (Programm *MultiSurf*⁶).

Die Zurückführung einer mehrfach gekrümmten Fläche oder einer Raumkurve auf eine ebene Projektion erscheint nicht nur unter dem Gesichtspunkt der Praktikabilität am CAD-Arbeitsplatz sinnvoll, sondern auch wenn man an den Anblick einer Yacht aus der Distanz denkt. Die äußere Erscheinung wird hier durch eine Projektion geprägt. Die Verwendung von Spanten, Wasserlinien und Schnitten ist in historischer Sicht eine Art reverse engineering: Der Rumpf, der als Halbmodell aus Holz in Form gebracht wurde, konnte zersägt als Schablone für die Spanten dienen. Heute weiß man wie die ebenen Schnitte eines Rumpfes auszusehen haben, daher kann man anhand ihrer Ansicht als abgeleitete Größe einer virtuellen, dreidimensionalen Fläche die Form des Rumpfes beurteilen. Die meisten CAD-Systeme, die sich auf den Entwurf von Schiffen und Yachten spezialisiert haben, verfügen über solche Werkzeuge, die dem Anwender die Ansicht des Rumpfes in der *gewohnten* Art eines Linienrisses ermöglicht.

Die Qualität eines CAD-Programmes zur Modellierung von Yachtrümpfen ist stark von den Erfordernissen des Entwerfenden abhängig. Viele bekannte Entwerfer verwenden seit Jahren das – für heutige Verhältnisse – sehr einfache *Fairline*-Programm von AeroHydro, das kein echtes 3D Programm ist, sondern auf der Ebene von Spanten und Stevenkonturen arbeitet und für eine weitergehende Verarbeitung alle notwendigen 2D-Schnitte exportieren kann.

⁶MultiSurf – AeroHydro, Inc., 54 Herrick Road, Southwest Harbor, ME 04679, USA

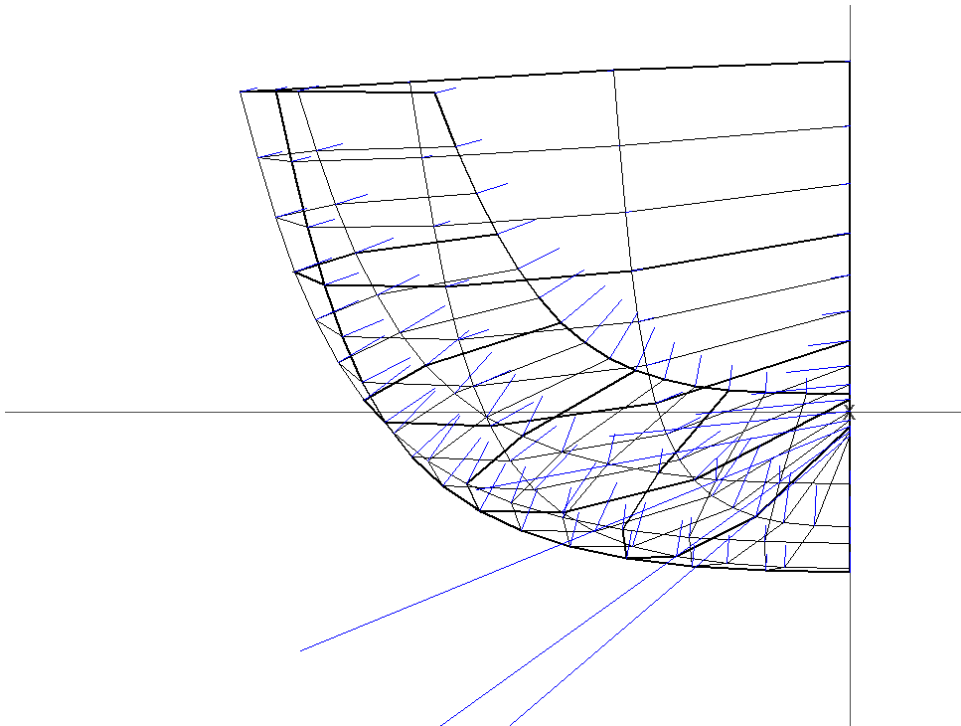


Bild 3: Überprüfung des Krümmungsverlaufs durch sog. *Porcupines* (Stachelschwein)

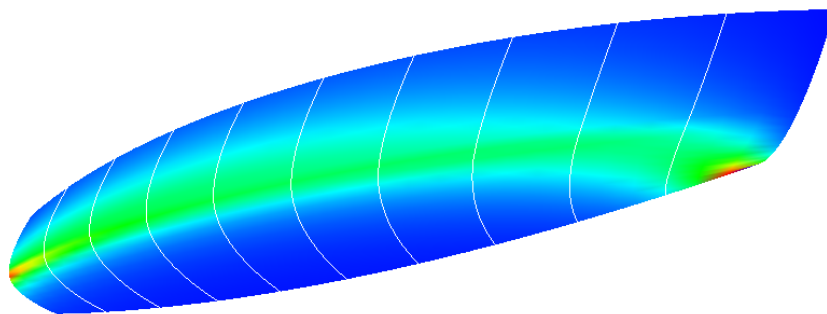


Bild 4: Überprüfung des Krümmungsverlaufs durch eine Falschfarbendarstellung an einem Rundspantboot

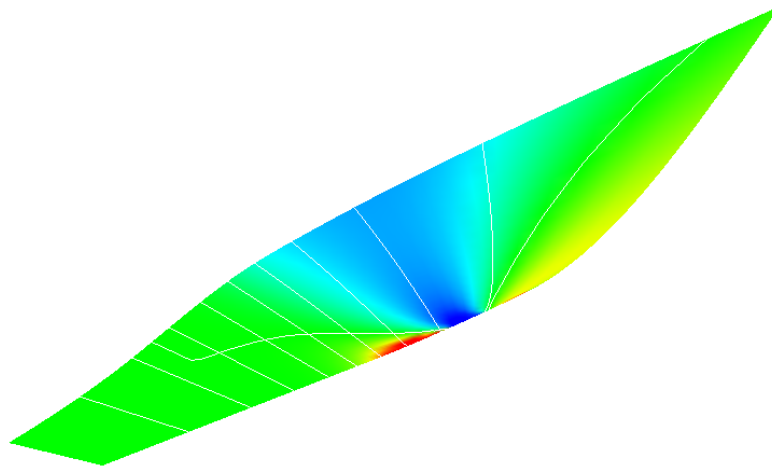


Bild 5: Überprüfung des Krümmungsverlaufs durch eine Falschfarbendarstellung an einem Knicksparter

Abhängig von dem Typ der Yacht gibt es zusätzlich Unterschiede bezüglich der Wahl des geeigneten CAD-Systems, die Konstruktionstiefe innerhalb des 3D Modells spielt eine weitere Rolle. Die Verwendung von generischen Modellen, d.h. Modelle in denen die Verfahren der Erzeugung gespeichert werden, nicht die durch die Erzeugung entstandene Ausprägung, halten zunehmend Einzug in den Entwurfsprozess. Bild 6 zeigt ein Spantgrüst mit Stringern, die sich je nach Position automatisch an die Form der Aussenhaut anpassen. Die Modifikation einer generisch erzeugten Yacht ist somit nahezu ohne Anpassungsarbeiten an den nachfolgenden Modellierungsschritten möglich.

3D CAD-Systeme stellen in der Regel allgemeine mathematische Flächenbeschreibungsmethoden zur Verfügung, deren Parameter direkt durch den Anwender manipuliert werden können. Die große Flexibilität in der Wahl der Modellgestaltung ermöglicht die Erzeugung immer komplexerer Modelle mit einer zunehmenden Modellierungstiefe. Zur schnellen Erzeugung spezieller Produkte, wie es Yachtrümpfe zweifellos sind, stellen allgemeine Modellieretechniken jedoch nur das Mittel der zweiten Wahl dar. Die Vor- und Nachteile konventioneller CAD-Systeme im Yachtentwurf können daher wie folgt zusammengefaßt werden. Vorteile des traditionellen Modellierens:

- Etabliert, weitverbreitet und damit für viele Designer gewohnt
- Sehr direkt

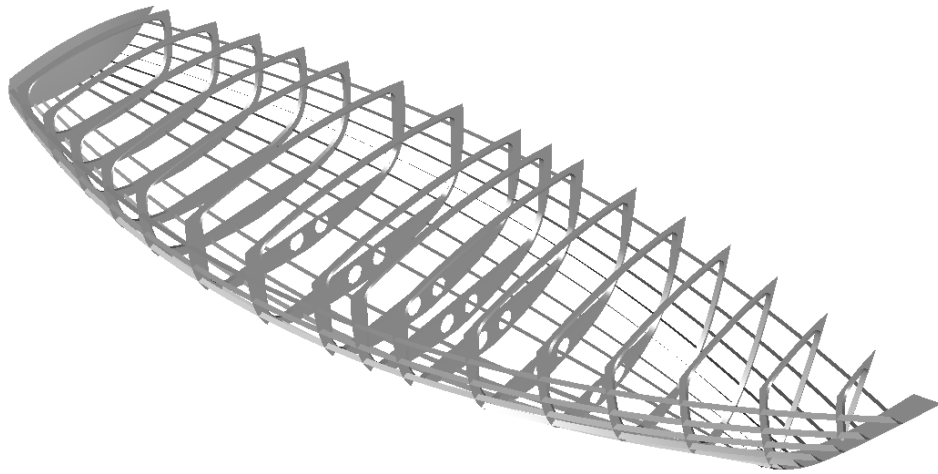


Bild 6: Relationales Spantgerüst mit Stringern (MultiSurf)

- Sehr flexibel und individuell für unterschiedlichste Topologien / Probleme einsetzbar

Nachteile:

- Sehr zeitaufwendig
- Mathematikorientiert ("wie statt was")

Aufgrund des zunehmenden Einsatzes wissenschaftlicher Methoden für den Entwurf von Regattayachten und der damit einhergehenden Forderung nach schnellen Erzeugungsmethoden für Rumpfvierungen, sind von den Autoren parametrische Entwurfsmethoden entwickelt worden, die sich für die Modellierung der Aussenhaut und von Anhängen einsetzen lassen. Die im folgenden Kapitel vorgestellten Methoden sind in das parametrische Entwurfswerkzeug FRIENDSHIP-Yacht eingeflossen, das in Kapitel 4 vorgestellt wird.

3 Parametrische Rumpfmmodellierung: FRIENDSHIP-Yacht

Die Vorgehensweise einer parametrischen Geometrieerzeugung unterscheidet sich grundlegend von den herkömmlichen Techniken des rechnergestützten Modellierens. Während im konventionellen Freiformentwurf die interaktive Bearbeitung mathematischer Kurven und Flächen im Vordergrund steht, konzentrieren sich parametrische Verfahren auf das zu entwickelnde Produkt bzw. die zu gestaltende Form. Zur Produktbeschreibung werden unmittelbar die gewünschten Merkmale – die sog. Parameter – herangezogen, die dabei als Eingabegrößen und

nicht mehr, wie zuvor, als Ausgabegrößen in den Modellierprozess eingehen. Der Prozess des Modellierens wird somit umgedreht. Diese Umkehrung ist in Bild 7 illustriert.

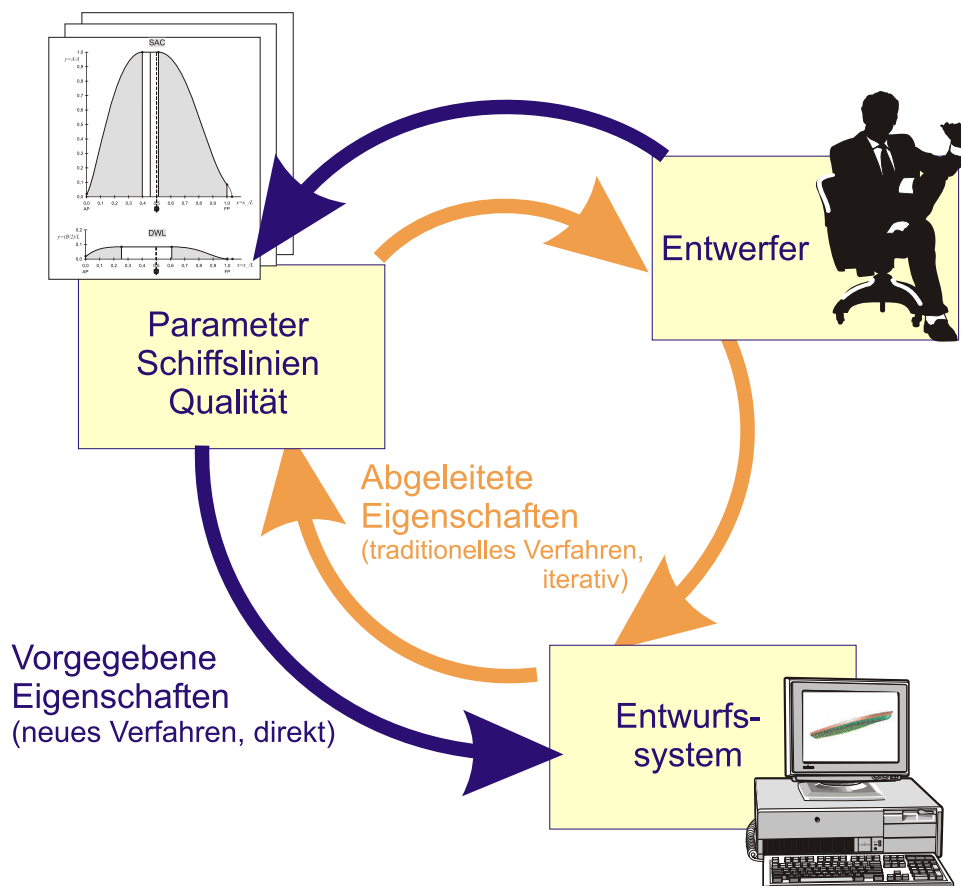


Bild 7: Konventionelles Modellieren (im Uhrzeiger) und parametrisches Entwerfen (entgegen Uhrzeiger)

Die Aufgabe eines parametrischen Entwurfssystems lautet dabei: *Bestimme die Produktgeometrie so, dass alle spezifizierten Eigenschaften – die gewünschten Parameter – erfüllt werden und gleichzeitig die entstehende Form als gut erachtet wird.* Natürlich ist die Güte einer Form kontextabhängig, so dass problemangepasste Lösungen gefunden werden müssen, um die Entwurfsarbeit bestmöglich zu unterstützen. Ziel des parametrischen Modellierens ist, dass man sich vollständig auf die kreative Aufgabe des Entwurfs konzentrieren kann, anstatt den Hauptteil der Arbeitszeit in dessen mathematische Realisierung zu investieren. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde von den Autoren ein neues Verfahren für den Entwurf von Yachten und Schiffen entwickelt, in dem alle Formen durch automatische Optimierungen entstehen, welche die gesetzten Formparameter genau erfüllen und gleichzeitig eine exzellente Glätte gewährlei-

sten. Diese Techniken sollen nachstehend kurz erläutert werden; mathematische Details sind von HARRIES (1998) beschrieben.

Die parametrische Rumpfmmodellierung in FRIENDSHIP-Yacht erfolgt in drei Schritten:

1. Modellierung von Grundkurven über Formparameter
2. Generierung von Querkurven über Formparameter aus den Grundkurven
3. Generierung von Flächen aus den Querkurven

Die Geometrie des Rumpfs wird im ersten Schritt festgelegt. Hier findet die Auswahl und Abstimmung der gewünschten Parameter statt, d.h. in diesem Schritt beschreibt der Konstrukteur die Yacht durch das eingängige Vokabular der Formparameter wie Länge der Schwimmwasserlinie, max. Breite und größter Tiefgang, Verdrängung, Verdrängungsschwerpunkt, Ausfallwinkel des Vorstevens, Öffnungswinkel der Schwimmwasserlinie am vorderen Lot. In den nachfolgenden Schritten werden diese Vorgaben umgesetzt, d.h. die Geometrie wird berechnet, so dass sie die eingegebenen Formparameter einhält und gleichzeitig eine hohe Qualität aufweist. Diese Generierungsschritte sind vollständig automatisiert, so dass der Entwerfende von der Hürde der mathematischen Umsetzung befreit ist. Im Ergebnis liegt eine geschlossene Flächenbeschreibung der Außenhaut (als B-Spline) vor, die anschließend mit konventionellen Systemen weiterbearbeitet werden kann.

Das neue Verfahren der parametrischen Rumpfmmodellierung orientiert sich damit an der traditionellen schiffbaulichen Vorgehensweise zur Geometriebeschreibung mittels sog. Grundkurven, d.h. (meist) Längskurven, die den Rumpf definieren. Beispiele für Längskurven sind die Deckskurve, die Konstruktionswasserlinie und die Lateralplankurve einschließlich der Stevenkonturen. Diese legen positionale Eigenschaften fest. Andere Grundkurven können integrale oder differentielle Eigenschaften abbilden. Eine prominente Längskurve zur Festlegung integraler Eigenschaften ist die Spantarealkurve, welche die Flächen eines jeden Spants unterhalb der Schwimmwasserlinie beschreibt und daher wichtige Parameter wie Verdrängung und Verdrängungsschwerpunkt (der Länge nach) beinhaltet. Differentielle Merkmale wie beispielsweise die Aufkimmung der Spanten an der Mittschiffsebene oder der Spantausfall auf Höhe des Decks können ebenfalls durch Längskurven definiert werden.

In den Grundkurven sind alle Informationen vereinigt, die zur Erzeugung des Rumpfs benötigt werden. Um den Entwurfsprozess bestmöglich zu unterstützen, können Grundkurven in Abhängigkeit der Modellieraufgabe gewählt und flexibel kombiniert werden. Alle Grundkurven werden aus den Formparametern auf Grundlage interner Optimierungen berechnet (Schritt 1). Dabei werden mathematische Kriterien der Glätte optimiert und die gewünschten Formparameter als Gleichheitsnebenbedingungen erfüllt. (Rechnerintern werden für alle Kurven nicht-lineare Gleichungssysteme gelöst.)

Liegen die Grundkurven und damit die gewollten Eigenschaften der Yacht fest, so wird die Rumpfform erzeugt, indem zunächst Querkurven, i.d.R. Spanten, und anschließend interpolierende Flächen berechnet werden. Die Querkurven erhalten hierbei alle notwendigen Informationen aus den Grundkurven, die ihre Formparameter festlegen. Alle Querkurven werden wiederum optimal bezüglich ihrer Glätte berechnet (Schritt 2). Nachfolgend werden die Querkurven als Skelett genutzt, das mit einer Fläche überzogen wird (Schritt 3). Alle Kurven und Flächen werden als offene B-Splines modelliert. Der Modellierprozess ist in Bild 8 veranschaulicht.

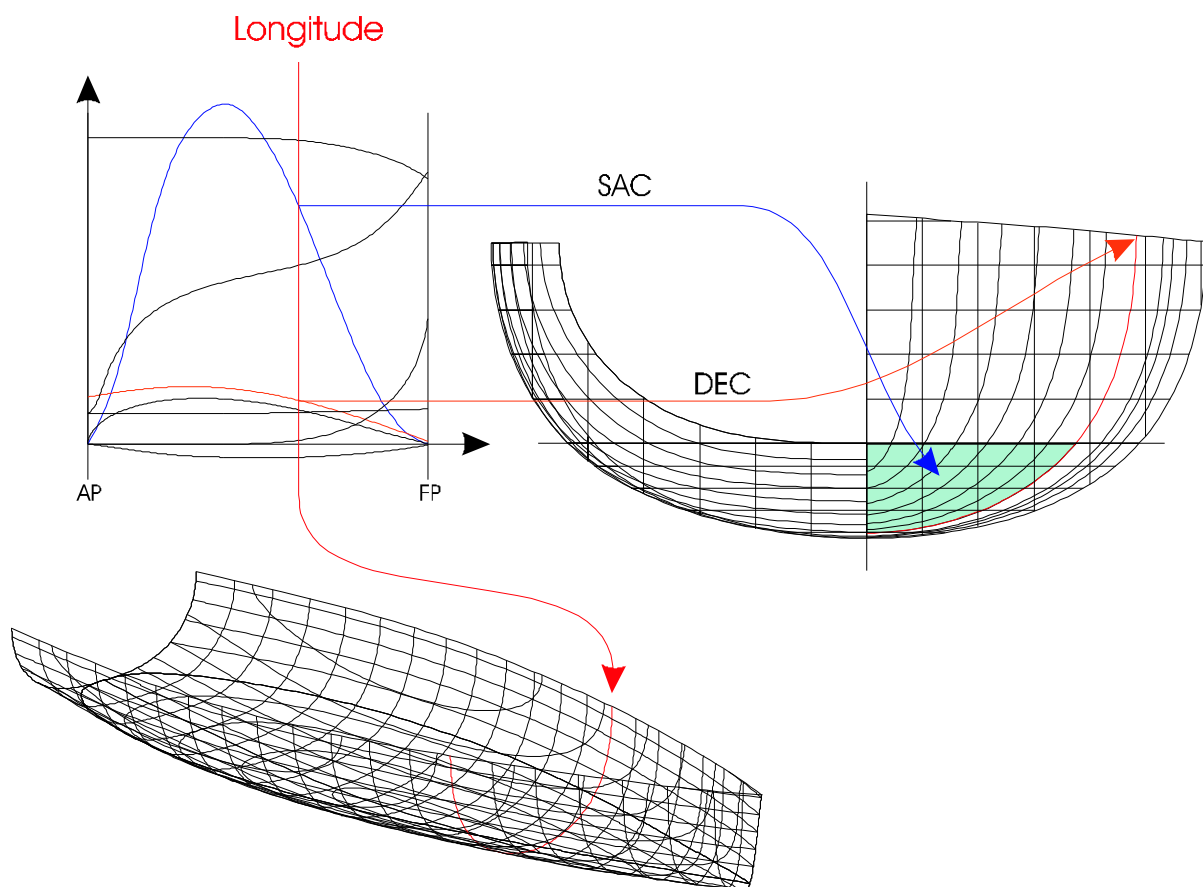


Bild 8: Querkurven (Spanten) erhalten Formparameter aus Grundkurven (Längskurven)

Entscheidend für den Anwender bei der Modellierung mit Formparametern ist, dass er oder sie sich nicht mit den mathematischen Methoden auseinandersetzen muss, sondern nur mit den Parametern arbeitet, d.h. Parameter aussucht und vorgibt. Das interne Verfahren berechnet dann die dazugehörige Geometrie. Die Sprache des Entwerfers verschiebt sich somit von der mathematischen Orientierung der konventionellen CAD-Systeme hin zu den entwurfsbezogenen Begriffen, die in der Diskussion mit Kunden, Kollegen, Geschäftspartnern etc. verwendet werden, Details siehe ABT ET AL. (2001a).

Hieraus ergeben sich die Vorteile des parametrischen Modellierens:

- Problemorientiert unter Verwendung einer hochwertigen Entwurfssprache ("was statt wie")
- intuitiv
- genau bzgl. gewünschter Formparameter
- glatt bzgl. des Straks
- schnell

sowie

- effizient für Variationen
- ideal zur Einbindung in automatisierte Optimierungen der Hydrodynamik

Damit ergänzt die neue parametrische Rumpfmmodellierung die konventionellen Methoden ausgezeichnet.

4 Beispiele zur Modellierung einer Yacht

FRIENDSHIP-Yacht speichert die Modelldaten eines Rumpfes in einem lesbaren Dateiformat ab, das die zielgerichtete Erzeugung eines Rumpfes in sehr kurzer Zeit ermöglicht, siehe Bild 9. Ausgehend von einer Parameterdatei mit überwiegend relativ definierten Parametern, können diese sukzessive durch absolute ersetzt werden, sofern der Anwender konkrete Vorstellungen für die einzelnen Größen hat. Aufgrund der von Beginn an kompletten Spezifikation der Parametrisierung, kann zu jeder Zeit ein Rumpf erzeugt werden und seine Eigenschaften mit den gewünschten verglichen werden. Der folgende Abschnitt zeigt einen Ausschnitt aus einer Datei, in der sich alle Parameter auf die Länge der Schwimmwasserlinie zurückführen lassen.

```
MAIN {                                     // Einige Hauptabmessungen
  lpp      12.0    m                        // Länge zwischen den Loten
  beamDeck 0.25   MAIN.lpp                 // maximale Breite an Deck
  draft    0.15   MAIN.beamDeck           // Tiefgang des Rumpfes
  freeboard 0.08  MAIN.lpp                // Freibord
}
```

Für einen Entwerfer bedeutet die direkte Vorgabe solcher wichtiger Parameter, dass er oder sie sich auf die eigenen Vorstellungen des Rumpfes konzentrieren kann, statt sie als abgeleitete

4 BEISPIELE ZUR MODELLIERUNG EINER YACHT

```

// Hanseboot FRIENDSHIP-Systems
MAIN {
  lpp          15          m          // Length be
  draft        0.6        m          // Maximum d
  beamDeck     4.2        m          // Maximum b
} // MAIN

BOW {
  zForefoot    -0.15     m          // Vertical
  overhang     0.7        m          // Distance
  freeboard    1.1        m          // Freeboard
  footRadius   0.15     m          // Length of
} // BOW

STERN {
  zEdge        0.15     m          auto:manual // The heigh
  overhang     0.5        m          // Distance
  freeboard    1.0        m          // Height of
  angle        -45       deg         // Positive
} // STERN

CPC {
  xPosMaxDraft 0.54      MAIN.lpp // Longitudi
  inclinationAtStern 10.0 deg         auto:manual
  inclinationAtFp 7      deg         manual // Angle mea
  inclinationAtAp 8.0   deg         auto:manual // Angle mea
} // CPC

SHEER {
  xPosMid      0.55     MAIN.lpp // Position
  inclinationAtStern 0.0 deg         auto:manual
  inclinationAtBow 5.0  deg         auto:manual // Angle mea
  heightAtPosMid 1.0   m          // The heigh
} // SHEER

DECK {
  xPosMaxBeam 0.6       MAIN.lpp // Position
  tanAtStern  15        deg         // Seen from
  beamAtStern 2.6       m          // Beam at d
} // DECK

FAS {
  dAtStern     0         deg         auto:manual // This para
  dAtMaxBeam   0         deg         auto:manual // This para
  dAtBow       0         deg         auto:manual // This para
  atStern     1.0        -          // This valu
  atMaxBeam   0.8        -          // This valu
  atBow       1.0        -          // This valu
} // FAS

FAB {
  dAtStern     0         deg         auto:manual // This para
  dAtMaxBeam   0         deg         auto:manual // This para
  dAtBow       0         deg         auto:manual // This para
  atStern     0.8        -          // This valu
  atMaxBeam   1.0        -          // This valu
  atBow       1.0        -          // This valu
} // FAB

TAD {
  dAtStern     135      deg         auto:manual // This para
  dAtMaxBeam   0         deg         auto:manual // This para
  dAtBow       -45     deg         auto:manual // This para
  atStern     10        deg         // The verti
  atMaxBeam   15        deg         // The verti
} // TAD

```

Bild 9: Auszug aus einer Parameterdatei

Eigenschaft überprüfen zu müssen. Die Modellierung einer neuen Yacht, auch mit deutlich unterschiedlichen Hauptabmessungen wird in der Regel mit der Festlegung der Länge beginnen.

```
MAIN {                                     // Einige Hauptabmessungen
  lpp      6.0 m                          // Länge zwischen den Loten
  beamDeck 2.75 m                          // maximale Breite an Deck
  draft    0.15 MAIN.beamDeck             // Tiefgang des Rumpfes
  .....
}
```

Da das Boot trailerbar sein soll, wird darüber hinaus die Breite auf ihren zulässigen Maximalwert gesetzt. Kleinere Boote besitzen bezogen auf die Länge ein größeres Freibord, daher sollte man hier einen etwas größeren Wert ansetzen.

```
MAIN {                                     // Einige Hauptabmessungen
  .....
  freeboard 0.13 MAIN.lpp                  // Freibord
}
```

Alternativ könnte man natürlich auch direkt den Wert für den Freibord angeben.

```
MAIN {                                     // Einige Hauptabmessungen
  .....
  freeboard 0.85 m                          // Freibord
}
```

Neben den Hauptabmessungen folgt die Parametrisierung des Rumpfes in weiten Teilen der fachüblichen Beschreibung von Booten, wie sie von Yachtkonstruktoren verwendet wird. Als definierende Elemente der Rumpfform werden Eigenschaften von Vor- und Achtersteven sowie der Rumpfkontur in der Seitenprojektion verwendet. Der Verlauf des Sprungs sowie die Wasserlinienprojektion des Decks dienen als weitere Grundkurven, deren Form vom Entwerfer vorgegeben wird. Alle bisher angesprochenen Eigenschaften sind direkt mit dem Verlauf einer Kante des Rumpfes gekoppelt, sie prägen die äußere Form der Yacht. Zur weiteren Spezifikation der Rumpfeigenschaften bietet der Modellierer die Möglichkeit die Spanteigenschaften über die Aufkimmung und den Spantausfall am Deck zu definieren. Beide Eigenschaften werden an

4 BEISPIELE ZUR MODELLIERUNG EINER YACHT

exponierten Positionen direkt vorgegeben und entlang des Rumpfes numerisch ausgetrakt. Bild 10 zeigt die Spantrisse zweier Rümpfe, die exakt dieselben Berandungskurven am Deck und der Kiellinie besitzen, jedoch mit einem unterschiedlichen Spantausfall am Hauptspant entworfen sind.

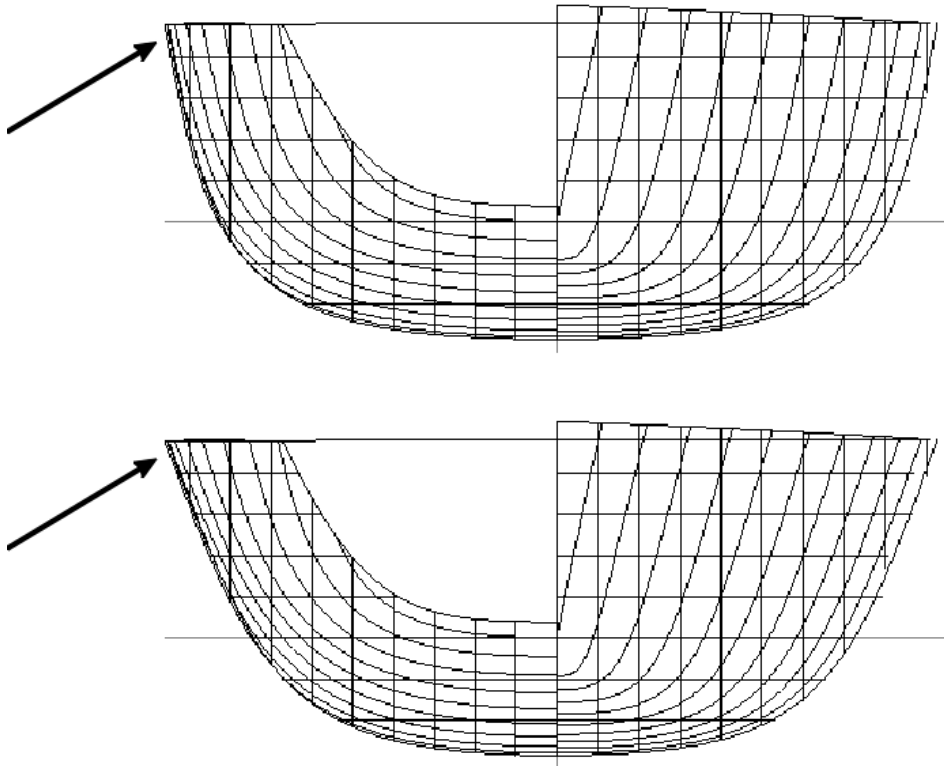


Bild 10: Variation des Spantausfalls am Hauptspant

Der Tangentenwinkel wird dabei für die beiden Varianten wie folgt definiert:

Variante 1:

```
TAD {                                // Tangente am Deck
    atMaxBeam      10 deg             // an der breitesten Stelle
}
```

Variante 2:

```
TAD {                                // Tangente am Deck
    atMaxBeam      20 deg             // an der breitesten Stelle
}
```

Die Deckstangente am Bug wird implizit durch die Vorstevenkontur und den Verlauf des Decks definiert. Aus der Tangentialebene, die durch die beiden Raumkurven aufgespannt wird, ist jeder andere Schnitt bereits festgelegt. Der Spantausfall am Spiegel kann vom Nutzer frei gewählt werden und ist für die oben gezeigten Beispiele bei 10° konstant gehalten. Über den Verlauf der Tangenten entlang der Deckschante und der Kielkontur hinaus kann über eine weitere Eigenschaft die Form entsprechend der Vorstellungen des Entwerfers gesteuert werden: Die *Geschwindigkeit* der Spanten am Deck und der Kiellinie wird durch die Parameter F_{AS} und F_{AB} gesteuert. Diese Parameter sind sicher die abstraktesten innerhalb der Parametrisierung, bieten aber viel Raum für die persönliche Note des Entwerfers. Anhand eines Beispiels am Spiegel soll die Wirkungsweise erläutert werden. In Bild 11 unterscheidet die beiden Rumpfe nur ein einziger Parameter, nämlich der F_{AB} .atStern, der auf die Werte 0.6 bzw. 1.0 gesetzt wurde. Die Veränderungen der Rumpfform werden dabei durch die unterschiedliche Krümmung des Rumpfes an der Mitschiffsebene am Heck deutlich. Die Spantform nahe des Spiegels tendiert bei höheren Werten der F_{AB} Parameter zu trapezförmigen Spanten, bei kleineren zu runden Spantformen.

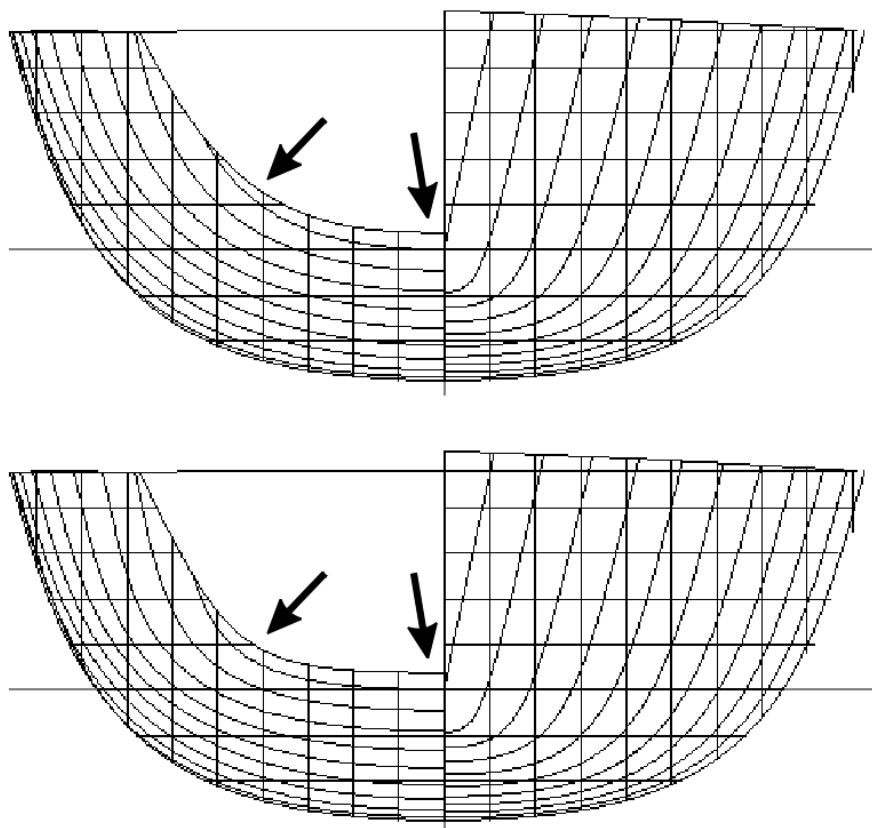


Bild 11: Variation der Spantkrümmung im Bodenbereich am Heck

4 BEISPIELE ZUR MODELLIERUNG EINER YACHT

Die in diesem Beispiel durchgeführte Modellierung sollte die Bedeutung und den Einfluß der von FRIENDSHIP-Yacht verwendeten Parameter erläutern. Die Planung eines Entwurfes kann gut mit Hilfe eines Text-Editors auf der Ebene der Parameterdatei erfolgen. Anschließend bietet eine graphische Benutzeroberfläche einen dreidimensionalen Eindruck des entworfenen Rumpfes mit allen üblichen Ansichten und Kontrollen eines modernen Entwurfswerkzeuges. Neben der gerenderten Darstellung der Außenhaut können Wasserlinien, Schnitte und Spanten in frei definierbaren Schnittebenen angezeigt werden und in einem zusätzlichen Fenster werden die hydrostatischen Eigenschaften simultan bereitgestellt, siehe Bild 12.

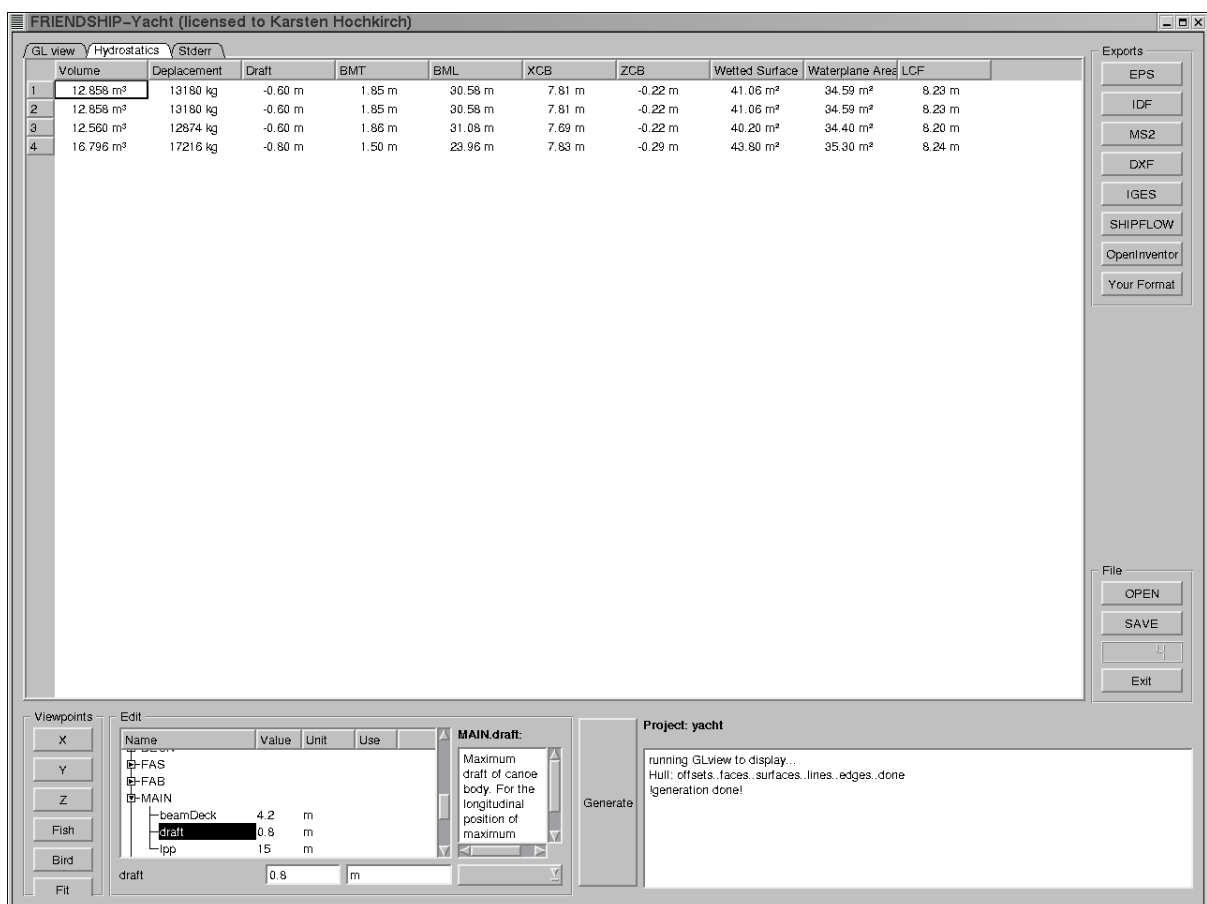


Bild 12: Alle notwendigen hydrostatischen Eigenschaften werden simultan zur Verfügung gestellt

Der FRIENDSHIP-Yacht Modellierer ist aus der Motivation heraus entstanden, eine parametrische Beschreibung von Rümpfen zur Verwendung in automatisierten Optimierungsprozessen bereitzustellen. Da die hydrodynamischen Eigenschaften einer Segelyacht neben der Rumpfform auch maßgeblich von der Konfiguration der Anhänge abhängt, befindet sich ein Modul für den parametrischen Entwurf von Kielen in der Entwicklung. Hierbei soll sich der

Entwerfer – entsprechend der Philosophie der Rumpfmodellierung – auf die relevanten Eigenschaften des Kiels konzentrieren können, nicht auf die mathematische Implementierung seines CAD-Systems. Profilparameter, Masse und Schwerpunktlage des Ballasts sind dabei die wichtigsten Eigenschaften, ergänzt durch die Lage des Kiels und z.B. Pfeilung und Verjüngung. Bild 13 zeigt einen mit dem Modul entworfenen Flachkiel an einer 10m Yacht. Ein Ausblick auf den Einsatz des Modellierers zur automatisierten Optimierung von Yachten mit Hilfe numerischer Simulationsprogramme wird im folgenden Kapitel gegeben.

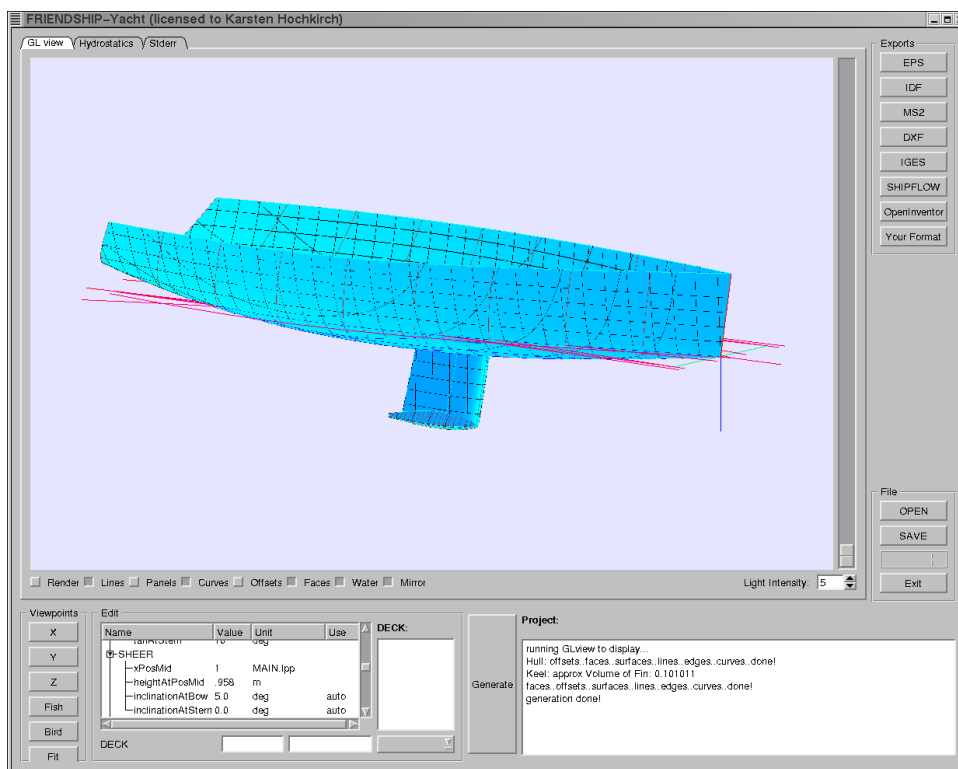


Bild 13: 10 m Fahrtenyacht mit Flachkiel

5 Automatisierte Optimierungen

Neben der wesentlich effizienteren Geometrieerzeugung mit Hilfe des parametrischen Ansatzes bietet die vorgestellte Methode die Möglichkeit, Generierung und Bewertung abgeleiteter Eigenschaften höherer Ordnung in einem geschlossenen automatisierten Optimierungsverfahren durchzuführen.

Da der Modellierprozess kontinuierlich von den Eingabeparameter abhängige Formen er-

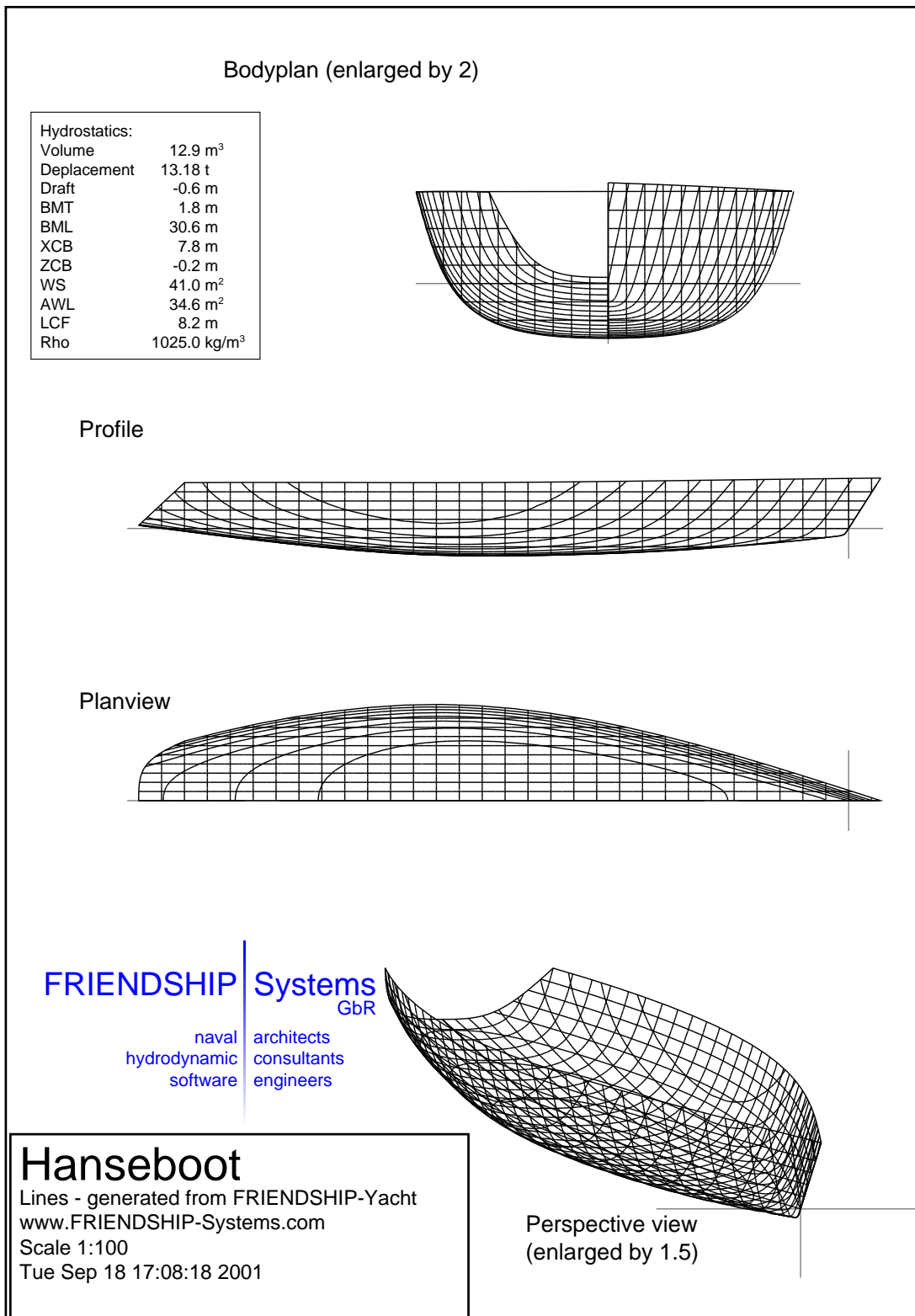


Bild 14: Ausgabe eines Linienrisses der Internetversion von FRIENDSHIP-Yacht

zeugt, können sehr effektive mathematische Verfahren eingesetzt werden, um eine Anzahl von Parametern für eine vorgegebene Eigenschaft zu optimieren.

Als Beispiel wurde von den Verfassern der Rumpf einer IACC⁷-Yacht modelliert (ABT ET AL., 2001b). Randbedingungen aus den Vermessungsregeln – beispielsweise wird die Länge des Rumpfes 20 cm oberhalb der Wasserlinie besonders bewertet – wurden als Nebenbedingungen direkt in den Modellierprozess eingebunden. In einer geometrischen Vorooptimierung werden verschiedene Parameter derart bestimmt, dass eine optimale Glätte bei einem exakt eingehaltenen Verdrängungsvolumen erzielt wird.

Die Ergebnisse dieser Vorooptimierung wurden mit dem potentialtheoretischen CFD-Werkzeug *SHIPFLOW* (LARSSON, 1997) untersucht. Als Gütefunktion wurde der Wellenwiderstand aus der Druckintegration verwendet, der mit Berücksichtigung der nichtlinearen Randbedingung an der freien Flüssigkeitsoberfläche bestimmt wurde. Bild 15 zeigt die Wellenkonturen aus einer solchen Berechnung.

Bei einer Froudezahl von $F_n = 0.307$ wurden die vier Parameter

- Längsposition der maximalen Breite der Konstruktionswasserlinie
- die Breite am Bug
- die Längsposition des maximalen Tiefgangs
- der Einlaufwinkel des Decks am Heck

innerhalb sinnvoller Grenzen zur Optimierung freigegeben.

In Bild 16 ist der Verlauf der Optimierung des Wellenwiderstands dargestellt. Da zur Optimierung eine konjugierte Gradientenmethode verwendet wird, muss in den ersten Iterationen zunächst der Einfluss der einzelnen Parameter auf das Gütekriterium bestimmt werden. In einer eindimensionalen Suche mit der Methode des goldenen Schnitts wird anschließend ein Optimum in der zuvor bestimmten Suchrichtung ermittelt (vgl. PRESS ET AL., 1988). Dieses Verfahren wird wiederholt, bis keine wesentlichen Verbesserungen mehr festzustellen ist. In der vorgestellten Beispielrechnung betrug der Wellenwiderstand der Ausgangskonfiguration 564 N. Während der ersten Iterationen konnte eine Reduktion von über 25 % erzielt werden. In den nachfolgenden Rechnungen wurden weitere Verbesserungen erreicht, die noch einige Prozente betragen.

Während die Reduzierung des Wellenwiderstands für eine (nicht gleitende) Motoryacht bereits als ein wesentliches Kriterium betrachtet werden kann (vgl. HARRIES ET AL., 2001; HARRIES UND ABT, 1999), beinhaltet das Optimierungsziel bei einer Segelyacht wesentlich mehr Aspekte: Hier muss zusätzlich der Einfluss von Krängung und Abdrift berücksichtigt

⁷IACC – International Americas Cup Class

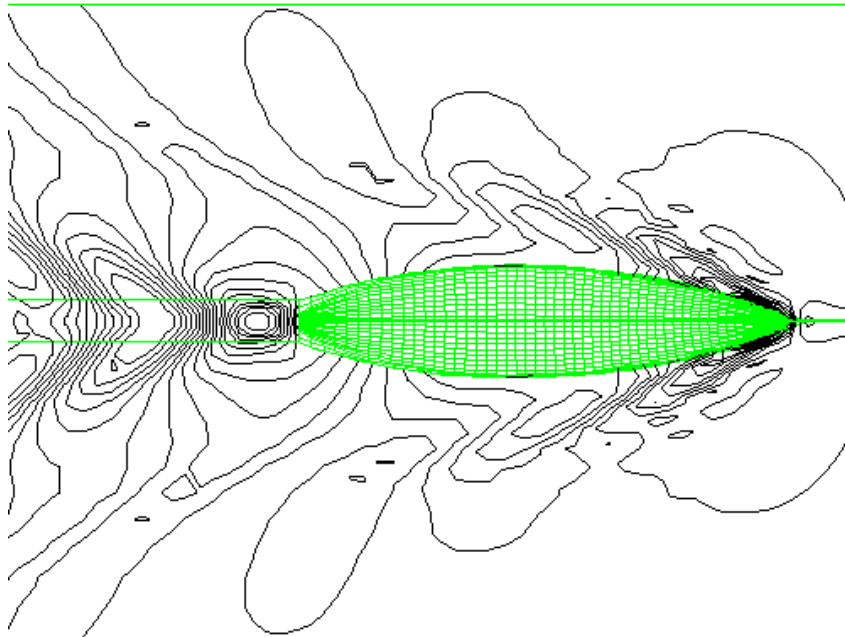


Bild 15: Wellenkonturen aus einer nicht linearen Rechnung für eine IACC-Yacht

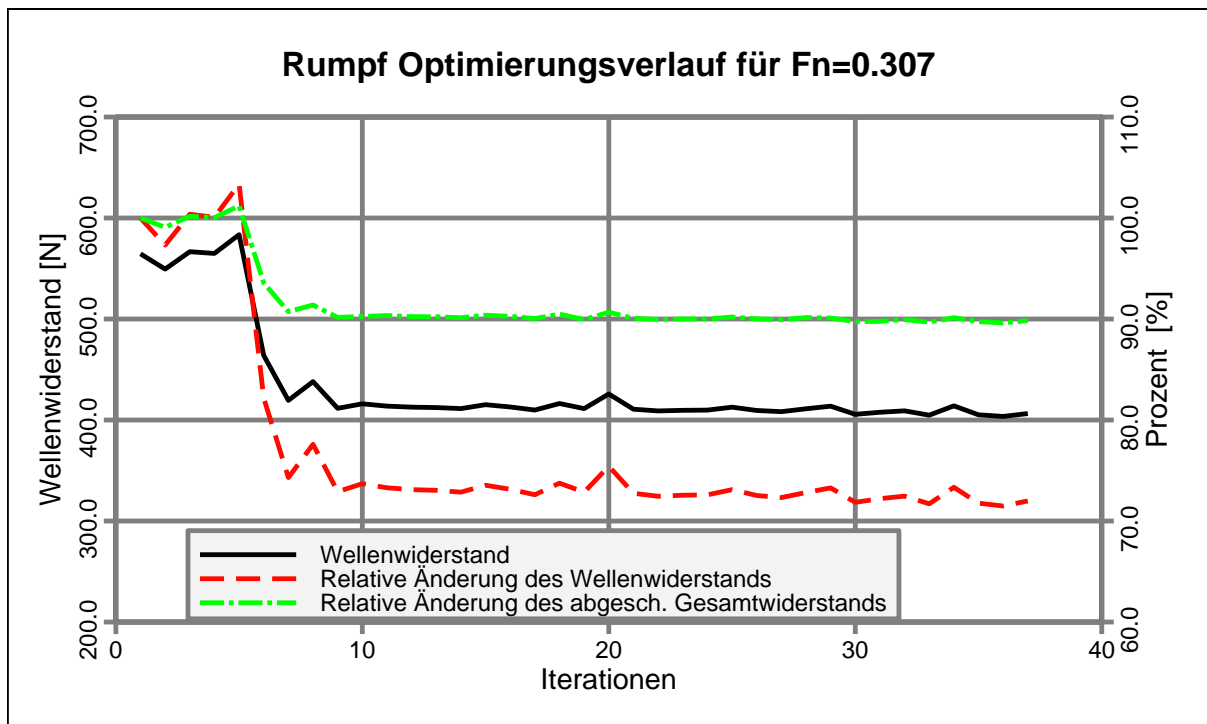


Bild 16: Konvergenzverlauf bei der Optimierung des Wellenwiderstands einer IACC-Yacht

werden und über ein VPP die Gleichgewichtszustände der aero- und hydrodynamischen Kräfte betrachtet werden (vgl. HOCHKIRCH, 2000).

Selbstverständlich muss bei diesen Ergebnissen beachtet werden, dass das Potenzial für mögliche Verbesserungen stark von der Qualität der Ausgangsgeometrie abhängt. Je besser der Originalentwurf, desto geringer der Raum für Verbesserungen. Darüber hinaus sind die Ergebnisse derartiger Optimierungen von den Möglichkeiten der jeweils eingesetzten Strömungsanalyse abhängig. In der Praxis müssen ggf. Modellversuche durchgeführt werden, um die Ergebnisse der numerischen Berechnungen zu verifizieren.

6 Zusammenfassung

Der Entwurf der Rumpfgeometrie einer Yacht stellt einen entscheidenden Schritt dar, der zu einem fortgeschrittenen Zeitpunkt im Konstruktionsprozeß nur unter sehr großem Aufwand verändert werden kann. Die Qualität eines Entwurfes hängt maßgeblich von der Qualität der Rumpfform ab, was – insbesondere bei prestigeträchtigen Entwürfen für den Regattasport – zu vermehrtem Einsatz wissenschaftlicher Methoden für die Rumpfoptimierung geführt hat.

Konventionelle CAD-Systeme für den Yachtentwurf sind mit ihren allgemeinen Methoden sehr gut für die individuelle Konstruktion geeignet, sind jedoch nur eingeschränkt für die Erzeugung systematischer Formvariationen, wie sie für formale Optimierungen benötigt werden, verwendbar.

Mit FRIENDSHIP-Yacht wurde ein neues CAD-Programm vorgestellt, das – ursprünglich für die automatisierte Optimierung großer Handelsschiffe entwickelt – dem Yachtentwurf neue Möglichkeiten in Bezug auf die schnelle Erzeugung qualitativ hochwertiger Rümpfe eröffnet. Als Ergänzung zu den existierenden CAD-Systemen wird Konstrukteuren die Möglichkeit gegeben, auf der Basis ihrer eigenen Sprache Rümpfe zu entwerfen und ihren Vorstellungen damit unmittelbar Gestalt zu geben, statt sich mit der Mathematik der Flächenbeschreibung Ihrer Entwürfe herumschlagen.

Schließlich stellt die Möglichkeit der Einbindung automatisierter Optimierungsverfahren einen Quantensprung im Entwurf von Regattayachten dar. Hierbei wird nicht der Entwerfende durch ein Programm ersetzt, sondern ihm die Möglichkeit eröffnet, einen Entwurf entsprechend seiner Erfahrung zu machen und selbstbestimmt ausgesuchte Parameter einer numerischen Optimierung zu unterziehen um das letzte Prozent seines Entwurfes herauszuholen.

7 Literatur

- Abt, C., Bade, D., Birk, L. und Harries, S.** (2001a): *Parametric hull form design - a step towards one week ship design, 8th International symposium on practical design of ships and other floating structures (PRADS 2001)*, Shanghai
- Abt, C., Harries, S. und Hochkirch, K.** (2001b): *Hydrodynamic modeling of sailing yachts, The Fifteenth Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis
- Harries, S.** (1998): *Parametric design and hydrodynamic optimization of ship hull forms*, Mensch & Buch Verlag, Berlin, ISBN 3-933346-24-X
- Harries, S. und Abt, C.** (1999): *Formal hydrodynamic optimization of a fast monohull on the basis of parametric hull design, Fifth International Conference on Fast Sea Transportation*
- Harries, S., Valdenazzi, F., Abt, C. und Viviani, U.** (2001): *Investigation on optimization strategies for the hydrodynamic design of fast ferries, 6th International Conference on Fast Sea Transportation*, Southampton
- Hochkirch, K.** (2000): *Entwicklung einer Meßyacht zur Analyse der Segelleistung im Originalmaßstab*, Mensch & Buch Verlag, Berlin, ISBN 3-89820-119-8
- Holtrop, J.** (1984): *A statistical reanalysis of resistance and propulsion data*, International Shipbuilding Progress, Vol. 31
- Holtrop, J. und Mennen, G.** (1982): *An approximate power prediction method*, International Shipbuilding Progress, Vol. 29
- Larsson, L.** (1997): *SHIPFLOW User's manual and theoretical manual*, FLOWTECH Int. AB, Gothenburg
- Letcher, J. S.** (1981): *Mathematical hull design for sailing yachts, The Fifth Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis
- Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. und Vetterling, W. T.** (1988): *Numerical recipes in C*, Cambridge University Press, New York
- Savitsky, D.** (1964): *Hydrodynamic design of planing hulls*, Marine Technology, Vol. 1(No. 1)

Symbole

FAB	Flat at Bottom
FAS	Flat at Side
F_n	Froudezahl