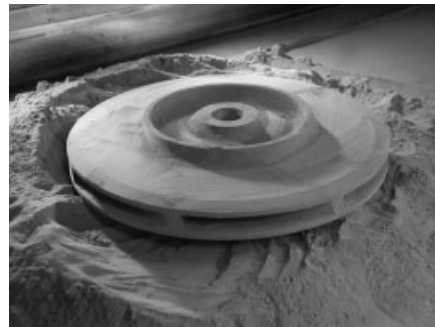


Virtuelle Produktmodellierung am Beispiel eines Pumpenlaufrades*

FRIEDRICH-KARL BENRA **, P. KÖHLER UND G. WITT

Durch die Verkürzung der Produktlebenszyklen werden die zur Verfügung stehenden Entwicklungszeiten entscheidend eingeschränkt. Es bleibt keine Zeit mehr für ein umfangreiches Erprobungsprogramm, bei dem die gewünschten Produkteigenschaften durch die Untersuchung und Abwandlung diverser Prototypen erzielt werden. Durch konsequenten Einsatz virtueller Techniken ist die Simulation der geforderten Produkteigenschaften und des Herstellungsprozesses möglich. Das Ergebnis einer so aufgebauten CAx-Prozesskette ist eine vollständige, durchgängig rechnerintegrierte Bauteilentwicklung. In diesem Beitrag wird ein derartiger Produktentstehungsprozess am Beispiel eines

Kreiselpumpenlaufrades detailliert beschrieben. Durch die Schaffung eines Anwendungssystems für die Berechnung, Konstruktion und Fertigung von Pumpenlaufrädern lässt sich der Entwicklungsprozess enorm verkürzen. Gleichzeitig ist damit eine wesentliche Senkung der Entwicklungskosten für ein äußerst effektives und zuverlässiges Produkt verbunden.



Virtual Modeling of Products
with a Centrifugal Pump Impeller
as an Example

Shortening of the product life cycles means less time for the development of a technical product. There is no more time for an extensive testing program to obtain the desired product properties by investigation and modification of various prototypes. By careful application of virtual techniques the simulation of the required product properties and the production process is possible. The result of a CAx-System is a complete computer-integrated construction unit development. In this contribution the product developing process is described in detail for a centrifugal pump impeller. The creation of an application system for the computation, construction and manufacturing of pump impellers shortens the development process enormously. At the same time the development costs for an extremely effective and reliable product become substantially lower.

1 Einleitung

Die Lebenszykluskosten von Kreiselpumpen werden im Allgemeinen zu über 90 % durch die Energiekosten bestimmt. Aus diesem Grund ist es äußerst wichtig, derartige Maschinen mit höchstmöglichen Wirkungsgraden auszuführen. In Abb. 1 ist als Beispiel eine 5-stufige Hochdruckpumpe in Gliederbauweise dargestellt [1]. Der Auslegungspunkt dieser Pumpe liegt bei einem Volumenstrom von ca. 350 m³/h und einer Förderhöhe von etwa 250 m. Die benötigte Antriebsleistung beträgt bei einem Wirkungsgrad von ca. 80 %

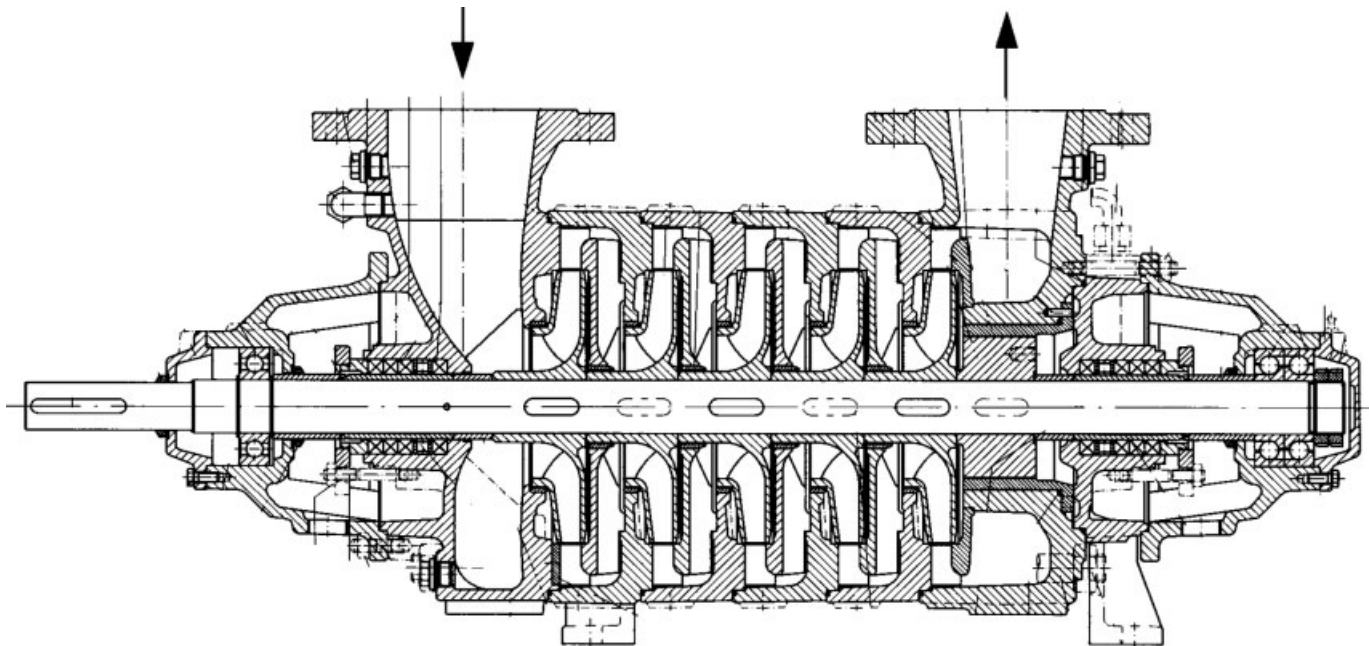
ungefähr 300 kW. Für das Laufrad als ein in einer vielstufigen Pumpe mehrfach eingesetztes Bauteil bedeutet das die Notwendigkeit einer äußerst genauen hydrodynamischen Berechnung, einer detaillierten Konstruktion sowie eines präzisen Fertigungsprozesses. Neben einer ausgefeilten Auslegungsmethode für den Geometrieentwurf bedingt dies auch den Einsatz moderner numerischer Methoden, um das hydrodynamische Betriebsverhalten, die mechanische Beanspruchung oder die Fertigung zu simulieren. Da dies ohnehin den Einsatz von Hochleistungsrechnern erfordert, ist es naheliegend, den gesamten Produktentstehungsprozess rechnergestützt durchzuführen. Dabei müssen wegen der Komplexität der Laufradgeometrie durchweg 3D-Verfahren eingesetzt werden.

Der Einsatz kommerzieller Softwaresysteme zur Ermittlung des 3D-Strömungsfeldes, zur Strukturanalyse, zur 3D-Konstruktion u. a. muss im Anwendungsfall mit selbst entwickelten Programmen und Features kombiniert werden, um eine effiziente Arbeitsweise zu ermöglichen. Selbst dann kann die verwendete Software nur eine Hilfsfunktion haben, die vom Anwender intelligent genutzt werden muss.

* Teil eines Vortrags anlässlich der VDI-Tagung „3D-Produktmodellierung – Fortschritte und Fallstricke“, 20./21. Juni 2001 in Stuttgart vorgetragen.

** Prof. Dr.-Ing. F.-K. BENRA (E-mail: benra@uni-duisburg.de), Institut für Energie- und Umweltverfahrenstechnik, Prof. Dr.-Ing. P. KÖHLER, Prof. Dr.-Ing. G. WITT, Institut für Produkt Engineering, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, Lotharstraße 1, D-47057 Duisburg, Germany.

Abbildung 1.
5-stufige Hochdruckpumpe.



2 Virtuelle Produktentwicklung

Bei der Entwicklung von Pumpenlaufrädern werden bereits seit längerer Zeit CAD-Systeme gewinnbringend eingesetzt. Für die Nutzung bestimmter Funktionen und Technologien sind 3D-CAD-Systeme unabdingbar [2 – 4]. Vor allem durch die Einführung parametrischer CAD-Datenstrukturen ergaben sich neue Rationalisierungspotentiale im Bereich der Anpassungs- und Variantenkonstruktion, da nun direkt variable Maße und Maßbeziehungen möglich wurden. Die damit erzeugten Volumenmodelle sind eine Voraussetzung zur Anbindung zusätzlicher Unterstützungssysteme, wie z. B. CFD, FEM sowie die Einbeziehung neuer Technologien zur Herstellung von Versuchsteilen (z. B. Rapid Prototyping). Zusätzlich müssen weitere Maßnahmen zur Daten- und Funktionsintegration im Produktentstehungsprozess vorgesehen werden. Dazu eignen sich besonders featurebasierte Ansätze, auf deren Basis die erforderlichen Anwendungskomponenten mit der notwendigen Flexibilität entwickelt werden können. Als Features werden dabei alle Informationsträger und Integrationsobjekte verstanden, die das Einbringen von Fachwissen in das parametrische Produktmodell ermöglichen.

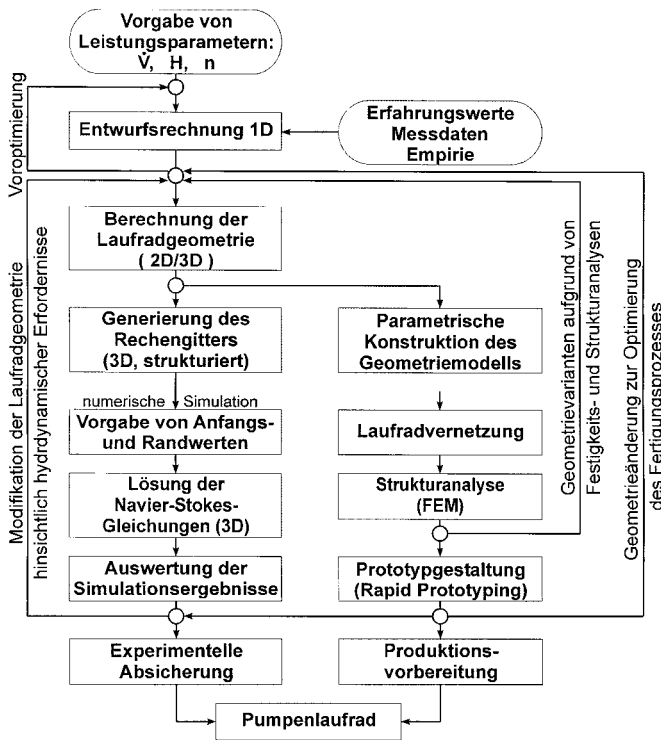
Für die Entwicklung eines Pumpenlaufrades werden als Softwarewerkzeuge neben den produktspezifischen Auslegungsmethoden auch entsprechende Strömungssimulationsverfahren zur Nachrechnung eingesetzt. Individuell programmierte Software in Form von Makros oder eigenständigen Programmen bzw. der Einsatz mathematischer Software ermöglichen den digitalen Geometrieentwurf des Laufrades. Durch die auf diese Weise durchgeführte Digitalisierung und Integration von Expertenwissen in ein durchgängiges rechnerintegriertes Datenmodell wird eine Kopplung zwischen dem geometrischen Entwurf und der Berechnung bzw. der Simulation der Produkteigenschaften herbeigeführt.

Die Gestalt eines Laufrades mit einem hohen hydraulischen Wirkungsgrad wird in erster Linie durch die Gesetze der Fluidodynamik bestimmt. Das zugrunde liegende Gleichungssystem (Navier-Stokes-Gleichungen) beschreibt die Fluidströmung in allen drei Koordinatenrichtungen. Die daraus resultierende Komplexität der Bauteilgeometrie erfordert den Einsatz dreidimensionaler Verfahren sowie ein umfangreiches Expertenwissen. Durch die Entwicklung entsprechender Programme und Features zur vereinfachten Verknüpfung von Berechnung und Gestaltung entsteht eine komplexe Entwicklungsumgebung für das Produkt Kreiselpumpenlaufrad [5, 6].

In Abb. 2 ist der Ablaufplan des Entwicklungsprozesses in seinen wesentlichen Schritten dargestellt. Ausgehend von der Vorgabe der geforderten Leistungsparameter wird zunächst eine einfache Entwurfsrechnung durchgeführt. In die dabei verwendete eindimensionale Stromfadentheorie fließen vorliegende Erfahrungswerte, Messdaten und empirische Zusammenhänge ein. Auf dieser Basis ist bereits eine Voroptimierung der Laufradauslegung möglich. Die anschließende Berechnung der fluidbenetzten Laufradgeometrie erfordert bereits zwei- bzw. dreidimensionale Methoden, um die räumliche Gestalt des Laufrades zu ermitteln. Im Anschluss daran kann bereits die parametrische Konstruktion des Geometriemodells erfolgen.

Parallel zu einer Festigkeits- und Strukturanalyse kann die numerische Simulation der Strömung durchgeführt werden [7, 8]. Die sich daraus ergebenden Modifikationen der Laufradgeometrie führen zu einem erneuten Durchlauf des Entwicklungsprozesses bevor direkt aus den CAD-Daten ein Prototyp zur experimentellen Überprüfung der Produkteigenschaften erstellt wird. Die Vorbereitung der Produktion richtet sich nach dem zu wählenden Fertigungsverfahren.

Abbildung 2. CAx-System für Pumpenlaufräder.



3 Laufradentwurf

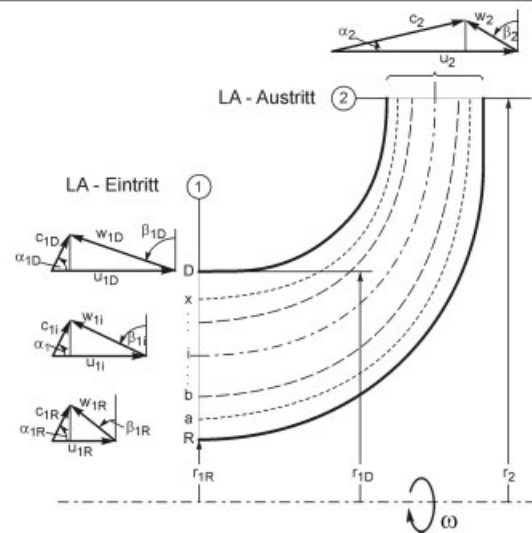
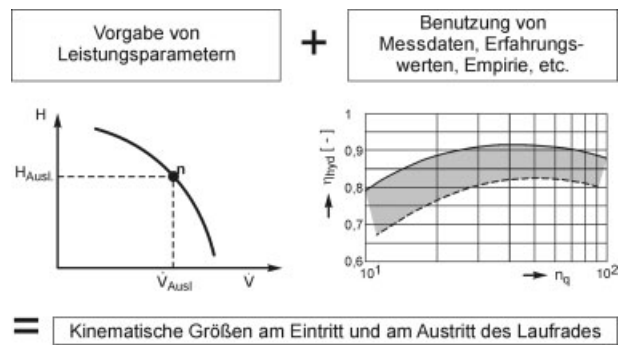
Für die Voroptimierung des in diesem Beitrag untersuchten Laufrades mit der spezifischen Drehzahl $n_q = 40 \text{ min}^{-1}$ wird ein eindimensionales Auslegungsverfahren herangezogen, das unter Verwendung von Erfahrungswerten und mit Hilfe empirischer Methoden den Entwurf einer Laufradgeometrie gestattet [9]. Der erreichbare Wirkungsgrad wird zu Beginn der Untersuchung geschätzt bzw. aus Messdaten ähnlicher Laufräder übernommen (s. Abb. 3). Damit liegt die erforderliche Totalenthalpieänderung zwischen der Eintritts- und der Austrittsebene des Laufrades fest¹⁾:

$$\Delta h_t = \omega(r_2 c_{u2} - r_1 c_{u1}) \tag{1}$$

Die kinematischen Strömungsgrößen, die zu einer Erfüllung der geforderten Leistungsparameter führen, lassen sich durch die Geschwindigkeitsdreiecke charakterisieren. Bei einer Absolutenintrittsströmung, die über der Laufradbreite mit einem konstanten Eintrittsdrall behaftet ist, ergeben sich zwischen Radscheibe und Deckscheibe aufgrund der Umfangsgeschwindigkeitsänderung stark unterschiedliche Geschwindigkeitsdreiecke. Um die Anströmung des Laufrades an allen Stromlinien optimal zu gestalten, muss die Laufradvorderkante der Zuströmung angepasst werden. Diese räumliche Verwindung der Schaufel im Zusammenhang mit der Strömungsumlenkung um 90° von der Anström- zur Abströmrichtung führt zu der ausgeprägt dreidimensionalen Geometrie eines Pumpenlaufrades.

Die Berücksichtigung einer entsprechenden Auslegungphilosophie, wie etwa die lineare Änderung der Me-

Abbildung 3. Entwurfsrechnung.



ridiangeschwindigkeit $c_{m2} = k c_{m1}$ zwischen Laufradeintritt und -austritt, führt auf das Geschwindigkeitsdreieck am Laufradaustritt, wenn entweder der Außendurchmesser oder der Abströmwinkel gewählt wird. Die Anwendung einer geeigneten Minderleistungsbeziehung ergibt schließlich den zu fertigenden Schaufelaustrittswinkel $\beta_{2\infty}$ des Laufrades:

$$\beta_{2\infty} = F(z, \varphi_2, r_1, r_2, \beta_2, \dots) \tag{2}$$

Infolge großer relativer Schaufelwinkel erhält man bei Radialpumpen lange Schaufeln mit großen Umschlingungswinkeln. Die Strömung wird dadurch auch bei kleinen Schaufelzahlen relativ gut geführt. Deshalb kann die Schaufelzahl auch unter Berücksichtigung der Fertigungsmöglichkeiten folgendermaßen bestimmt werden:

$$z \approx 6,5 \frac{1 + \nu_1}{1 - \nu_1} \sin\left(\frac{\beta_1 + \beta_{2\infty}}{2}\right) \tag{3}$$

Entscheidend für den Entwurf eines Laufrades mit gutem hydraulischem Wirkungsgrad ist die Beantwortung der Frage nach dem Verlauf der Strömungsgrößen zwischen der Laufradeintritts- und der Laufradaustrittsebene. Einfache Ein- oder Mehrkreisbogenprofile erfüllen zwar die kinematischen Bedingungen am Eintritt und am Austritt des Laufrades, berücksichtigen zumeist aber nicht deren geforderten Verlauf innerhalb des Strömungskanal. Einzig punktwise konstruierte Schaufeln sind in der Lage, den ge-

1) Eine Zusammenstellung der Formelzeichen befindet sich am Schluss des Beitrags.

wünschten Verlauf der Strömungsgrößen innerhalb des Schaufelkanals mit ausreichender Genauigkeit zu erfüllen.

Eine zentrale Bedeutung für die Entwicklung der Strömungsgrößen zwischen Laufradeintritt und -austritt nimmt die Frage nach der Änderung des Dralls der Absolutströmung ein. Für eine schaufelkongruente Strömung kann die Übertragung der Energie auf die Förderflüssigkeit durch die Zunahme der Totalenthalpie beschrieben oder durch folgende Frage formuliert werden: Wie verändert sich der Relativströmungswinkel β vom Wert β_1 auf den Wert β_2 ? Mit der Beantwortung wird die Zunahme der Totalenthalpie der Strömung festgelegt. Für die Stromlinien an der Deck- und an der Radscheibe werden hier folgende Relativströmungswinkelverteilungen entlang der dimensionslosen Koordinate M vorgegeben [10]:

$$\beta(M) = \beta_1 + AM + BM^2 + CM^3 \tag{4}$$

$$A = -4(\beta_2 - 2\bar{\beta} + \beta_1) \tag{5}$$

$$B = 11\beta_2 - 16\bar{\beta} + 5\beta_1 \tag{6}$$

$$C = -6\beta_2 + 8\bar{\beta} - 2\beta_1 \tag{7}$$

$$\bar{\beta} = 90^\circ K + \frac{1-K}{2}(\beta_2 + \beta_1); \quad K \leq 1 \tag{8}$$

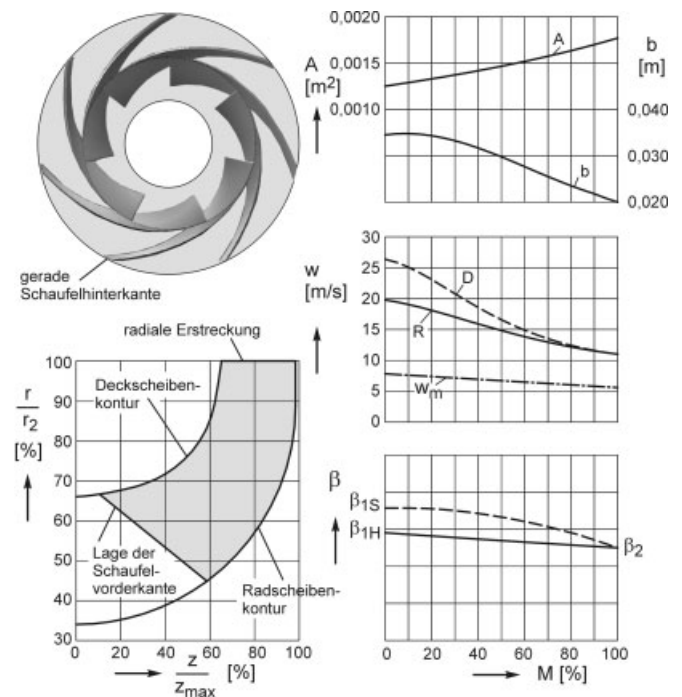
An der Deckscheibe soll der Winkel vom Laufradeintritt zum -austritt abfallen. An der Radscheibe ergibt sich bei gleichem Absolutströmungsvektor aufgrund der geringeren Umfangsgeschwindigkeit am Eintritt ein kleinerer Relativströmungswinkel β_{1R} . Eine ähnliche Funktion, wie sie für die Deckscheibe gewählt wurde, hätte zur Folge, dass entlang des wesentlich längeren Weges der Radscheibenstromlinie nur sehr geringe Schaufelwinkeländerungen zu verzeichnen wären. Aus der Beziehung zur Berechnung des Umschlingungswinkels:

$$\Theta = \int_0^M \frac{\tan \beta}{r} dM \tag{9}$$

ergäbe sich an der Radscheibe ein von der Deckscheibe stark abweichender Umschlingungswinkel, was zu einer extrem schrägen Schaufelaustrittskante führen würde [11, 12]. Um diese ungünstige Form der Schaufelhinterkante zu vermeiden, muss entweder der Schaufeleintrittswinkel an der Radscheibe vergrößert, der Winkelverlauf entlang der Radscheibe entsprechend Gl. (4) durch Variation des Parameters K geändert und/oder die Länge der Radscheibenstromlinie durch Zurückziehen und Schrägstellen der Schaufelvorderkante verkürzt werden.

Mit den gewählten Strömungswinkelverläufen an der Rad- und an der Deckscheibe lässt sich unter Beachtung der durch die Schaufeldicke verursachten Versperrung des Strömungskanals der Verlauf von Rad- und Deckscheibenkontur bestimmen. Damit wird die Umlenkung der Strömung aus der axialen Anström- in die radiale Abströmrichtung festgelegt. Diese Umlenkung des Fluids um etwa 90° soll möglichst verlustarm und im Hinblick auf das Bauvolumen mehrstufiger Pumpen mit geringem axialem Platzbedarf erfolgen. Ausgehend von einer gewählten Form der

Abbildung 4. Eindimensionale Auslegungsrechnung.



Radscheibe wird mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung die Strömungsfläche eines Schaufelkanals und damit schließlich die Deckscheibenkontur berechnet:

$$A(M) = \frac{b(M)}{z} \{ \pi [r_R(M) + r_D(M)] - z \Delta s(M) \} \tag{10}$$

Sinnvolle Möglichkeiten für die Form der Radscheibe sind:

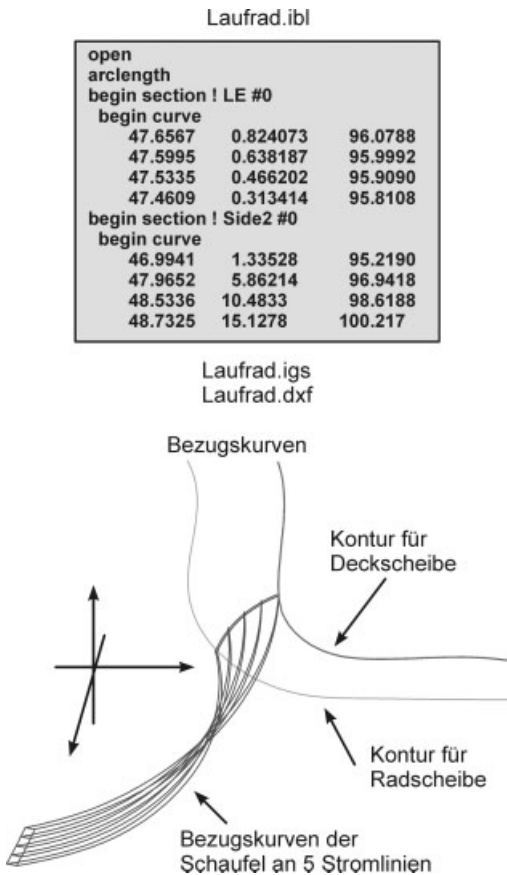
- Die Radscheibe ist als Kreisbogen ausgebildet.
- In Richtung Eintritt und Austritt wird der Kreisbogen durch eine Gerade verlängert.
- Die Radscheibe ist als Ellipse ausgebildet.

In Abb. 4 sind der Meridianschnitt und die wichtigsten Strömungsgrößen des aus der 1D-Auslegungsrechnung entwickelten Laufradentwurfs dargestellt. Das Laufrad hat an der Radscheibe eine in den Saugmund zurückgezogene Schaufelvorderkante. Demzufolge sind die Meridianstromlinien an Deck- und Radscheibe etwa gleich lang, und die Schaufelwinkelverteilungen an der Deckscheibe und an der Radscheibe können ähnlich gewählt werden. Beide fallen stetig vom Wert des Eintrittswinkels auf den Austrittswinkel ab. Mit den hier dargestellten Größen sind alle zur Konstruktion der dreidimensionalen Laufradgeometrie benötigten Werte bekannt.

4 Generierung des Laufradmodells

Für die 3D-Modellierung werden in jedem Fall Koordinatensysteme benötigt, die bei professionellem Arbeiten durch weitere Bezugselemente ergänzt werden. Dazu gehören Ebenen, Punkte und Kurven, die für den logischen Aufbau des rechnerinternen Datenmodells zweckmäßig sind [13, 14]. Entsprechende Bezugselemente für die geometrische Modellierung des Laufrades kann bereits die hydrodynamische

Abbildung 5. Bezugskurven des Pumpenlaufrades.



sche Auslegungsberechnung liefern. Durch sie werden die innere Rad- und Deckscheibenkontur sowie die Schaufelgeometrie und die Schaufelzahl festgelegt. In Abb. 5 sind die aus der Entwurfsrechnung ermittelten Bezugskurven enthalten. Diese Konturdaten werden über ein spezielles Dateiformat in das CAD-System eingelesen.

Durch die Auslegungsberechnung sind auch die Innen- und Außendurchmesser der Rad- und Deckscheibe sowie die Laufradbreite festgelegt.

Der automatische Modellaufbau erfolgt im Wesentlichen in 5 Schritten:

- Einlesen der Bezugskurven und Daten aus der Auslegungsberechnung,
- Erzeugen einer Schaufelgeometrie,
- Musterung der Schaufel entsprechend der benötigten Anzahl,
- Erzeugen der Rad- und Deckscheibe,
- Feingestaltung des Laufrades.

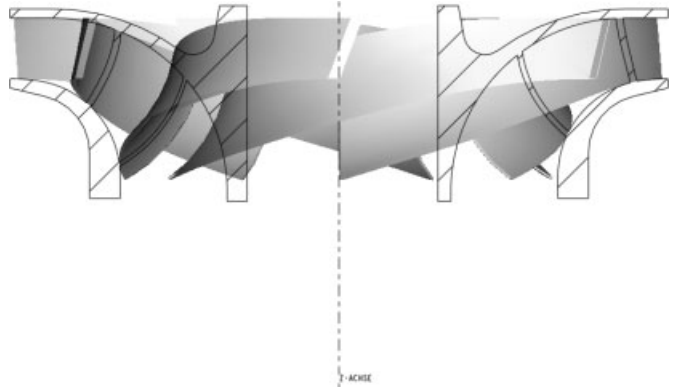
Die Features zur Gestaltung der Rad- und Deckscheibe sichern notwendige Materialzugaben, Rundungen und Fasen, die sich im Wesentlichen aus fertigungstechnischen Erfordernissen ergeben. In Abb. 6 ist die Anordnung der Schaufeln auf der Radscheibe dargestellt. Die Deckscheibe wurde hierfür ausgeblendet. Für Abb. 7 wurde ein Profilschnitt durch das Laufrad gelegt, der die geometrischen Ausprägungen der Rad- und Deckscheibe verdeutlicht.

Das Laufradmodell kann für Festigkeitsberechnungen und Strukturanalysen mit einem FEM-System genutzt werden. Auch hierbei müssen entsprechende Dialog-

Abbildung 6. Schaufelmuster.



Abbildung 7. Profilschnitt des Laufrades.



elemente und Features den teilautomatisierten Aufbau des Berechnungsmodells sichern. Ebenso können aus dem 3D-Modell erforderliche Daten für die Fertigung abgeleitet werden. Die entwickelten Featuretechniken helfen, entsprechende Partialmodelle fertigungsgerecht zu generieren.

Alle hier dargestellten Modellierungsschritte für das Pumpenlaufrad sind rechnerintern so abgelegt und verknüpft, dass bei Änderungen bzw. Anpassungs- und Variantenkonstruktionen nur noch wenige Eingriffe bzw. Benutzerdialoge erforderlich sind. Eventuelle Änderungen, die sich aus der numerischen Simulation mit dem nun realitätsnahen Modell ergeben bzw. aufgrund vorgenommener Festigkeitsanalysen erforderlich sind, können über die Änderung oder Anpassung der entsprechenden Bezugskurven und der eingeführten produktdefinierenden Parameter gesteuert werden.

5 Numerische Simulation

Die Strömung eines Fluids lässt sich durch die physikalischen Prinzipien der Erhaltung von Masse, Impuls und Energie beschreiben. Betrachtet man ein durchströmtes Kontrollvolumen V mit einer in Bezug auf Ort und Zeit unveränderlichen Oberfläche S , so lassen sich die Erhaltungsgleichungen für ein homogenes Fluid in einem ortsfesten Bezugssystem in konservativer Schreibweise folgendermaßen angeben [15]:

$$\frac{\partial U^*}{\partial t} + \sum_{m=1}^3 \frac{\partial F_m^*}{\partial x_m^*} - \frac{1}{Re_\infty} \sum_{m=1}^3 \frac{\partial G_m^*}{\partial x_m^*} = 0 \tag{11}$$

$$U^* \left(x_m^*, t^* \right) = \begin{pmatrix} \rho^* \\ \rho^* u_1^* \\ \rho^* u_2^* \\ \rho^* u_3^* \\ \rho^* e_{tot}^* \end{pmatrix} \tag{12}$$

$$F_m^* = \begin{pmatrix} \rho^* u_m^* \\ \rho^* u_m^* u_1^* + \delta_{1m} P^* \\ \rho^* u_m^* u_2^* + \delta_{2m} P^* \\ \rho^* u_m^* u_3^* + \delta_{3m} P^* \\ u_m^* (\rho^* e_{tot}^* + P^*) \end{pmatrix} \quad (13)$$

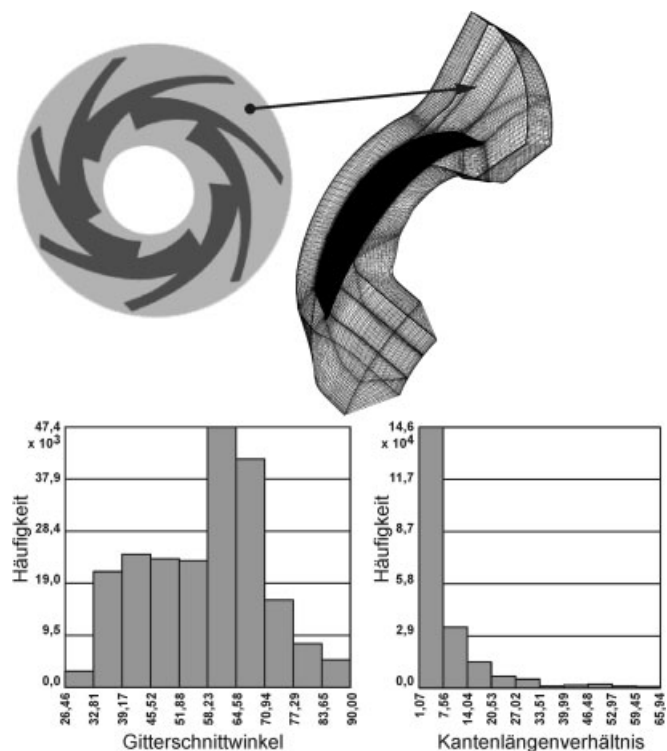
$$G_m^* = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{m1}^* \\ \tau_{m2}^* \\ \tau_{m3}^* \\ \sum_{i=1}^3 u_i^* \tau_{im}^* + \dot{q}_m^* \end{pmatrix} \quad (14)$$

Die näherungsweise numerische Lösung eines solchen Systems von Differentialgleichungen beruht auf der Diskretisierung der Gleichungen. Dabei werden die Zustandsgrößen nur in diskreten Punkten im Raum zu bestimmten Zeitpunkten beschrieben. Dazu wird ein Rechengitter benötigt, auf dessen Knotenpunkten die Lösung der Berechnungsgleichungen erfolgt. Die Qualität eines strukturierten Rechengitters, die auch die Qualität der Lösung maßgeblich beeinflusst, kann durch die Schnittwinkel der Gitterlinien, die Kantenlängenverhältnisse sowie die absolute Größe der Kontrollvolumina beschrieben werden.

In Abb. 8 ist das Rechengitter eines Strömungskanals des Laufrades einschließlich dieser Qualitätskriterien dargestellt. Das Gitter wurde mit dem Gittergenerator CFX-Turbogrid [16] erzeugt und hat etwa 220 000 Knotenpunkte. Damit ist eine ausreichende räumliche Auflösung des Rechengebietes selbst im Wandgrenzschichtbereich gewährleistet.

Die Lösung des Differentialgleichungssystems benötigt Anfangs- und Randbedingungen. Beim Start der

Abbildung 8. Rechengitter für die Strömungssimulation.



Berechnung eines Problems muss ein Zustand des Strömungsfeldes als Anfangswertverteilung vorgegeben werden. Gleichzeitig werden Angaben über die Art der Berandung des Strömungsgebietes und die Angabe der Bedingungen, welche die Strömung an der Berandung erfüllen muss, als Randwertverteilung benötigt. Die für die Strömungssimulation verwendeten Randbedingungen sind in Tab. 1 aufgeführt. Das hier eingesetzte Lösungsverfahren ist das kommerziell erhältliche und in Strömungsmaschinenanwendungen häufig eingesetzte Programm CFX-TASCflow [17 – 19].

In Abb. 9 ist im oberen Teil der berechnete Totaldruck in der Periodizitätsebene zwischen zwei Schaufeln (Meridianebene) im Auslegungspunkt des Laufrades dargestellt. Die Linien konstanten Totaldrucks zeigen innerhalb

Tabelle 1. Vorgabe von Rand- und Startwerten.

Rand	Randbedingung
• Eintrittsebene:	Massenstrom und Richtung des Absolutströmungsvektors
• Austrittsebene:	Flächengemittelter statischer Druck
• Turbulenz:	k - ε - Turbulenzmodell mit logarithmischem Wandgesetz, c _w = 0
• Medium:	Dichte: ρ = 998,2 kg/m ³ Zähigkeit: ν = 1,004 mm ² /s
• Drehzahl:	n = 2950 min ⁻¹

Abbildung 9. Totaldruckentwicklung im Absolutsystem [Pa].

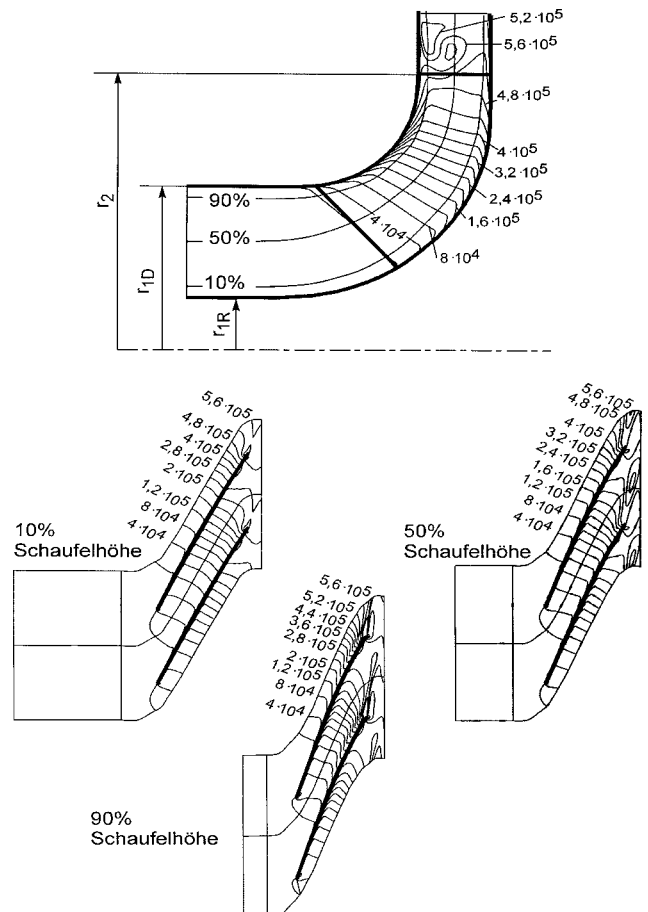
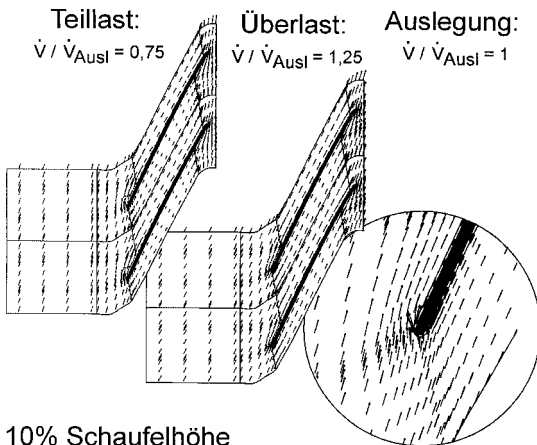
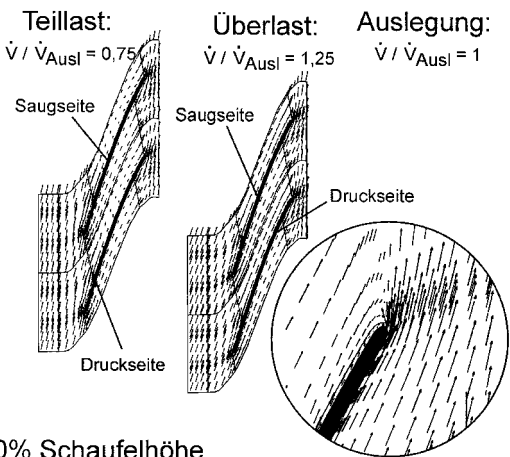


Abbildung 10.
Relativgeschwindigkeitsvektoren in verschiedenen Betriebspunkten.



10% Schaufelhöhe



90% Schaufelhöhe

der Beschafelung einen kontinuierlichen Druckaufbau, der lediglich am Laufradaustritt geringfügig gestört ist. Die Betrachtung von Umfangsschnitten bei drei verschiedenen Schaufelhöhen bestätigt dieses Ergebnis und lässt in der Nähe der Deckscheibe (90 % Schaufelhöhe) nahe der Saugseite den gestörten Bereich deutlich erkennen.

In Abb. 10 sind die Vektoren der Relativgeschwindigkeiten in den Umfangsschnitten nahe der Radscheibe und nahe der Deckscheibe für drei Betriebspunkte dargestellt. Im Teillastpunkt ist eine Umströmung der Schaufelvorderkante mit hohen Geschwindigkeiten an der Saugseite zu verzeichnen. Im Bereich der Druckseite sind die Strömungsgeschwindigkeiten in Radscheibennähe klein, jedoch löst die Strömung nicht ab. In der Nähe der Deckscheibe ist ein Gebiet an der Druckseite und ein Gebiet an der Saugseite mit kleinen Geschwindigkeiten vorhanden. Im Auslegungspunkt des Laufrades ist im Bereich der Radscheibe eine geringe Fehlanströmung erkennbar. Der Stau-punkt der Strömung ist zur Druckseite der Schaufel verschoben. Dadurch ergibt sich eine Umströmung der Schaufelvorderkante mit hohen Geschwindigkeiten an der Saugseite. Im Deckscheibenbereich ist an der Schaufel-hinterkante ein erheblicher Geschwindigkeitsunterschied zwischen Saugseite und Druckseite erkennbar.

Im Überlastbereich ist die Anströmung der Schaufelvorderkante sowohl im Radscheibenbereich als

auch im Deckscheibenbereich gegenüber dem Teillast-betrieb deutlich verbessert. Es ist kein Gebiet mit vermin-derten Strömungsgeschwindigkeiten festzustellen. Gegen-über dem Teillastpunkt und zum Teil auch gegenüber dem Auslegungspunkt ist die Strömung deutlich verbessert. Als Ergebnis der Untersuchung der Strömung mittels numeri-scher Simulation kann festgehalten werden, dass der Schaufeleintrittswinkel im Radscheibenbereich geringfügig geändert werden sollte.

6 Prototypgestaltung und Fertigung

Bisher wurden Prototypen von Pumpenlaufrädern überwie-gend konventionell, d. h. spanend, hergestellt. Mittels Rapid Prototyping ist es seit geraumer Zeit möglich, Modelle und Prototypen direkt aus den 3D-CAD-Daten zu erbauen. Die Verfahren des Rapid Prototypings sind dabei vor allem zum Bau von geometrisch komplexen Modellen prädestiniert. Der Vorteil neben der Zeit- und Kostenersparnis ist, dass ein einheitliches Datenmodell von der Konstruktion bis zur Fertigung genutzt wird und somit Fehler, die z. B. bei der Er-stellung eines NC-Programmes entstehen können, vermie-den werden. Alle bekannten Verfahren haben das Prinzip des generativen, d. h. schichtweisen, Baus der Teile gemein-sam, unterscheiden sich jedoch bezüglich der verwendeten Werkstoffe und Prozesse [20, 21]. In dem hier vorliegenden Fall wurde das Verfahren des selektiven Lasersinterns ein-gesetzt, um einen für die experimentelle Überprüfung der geforderten Produkteigenschaften geeigneten Prototypen zu erzeugen.

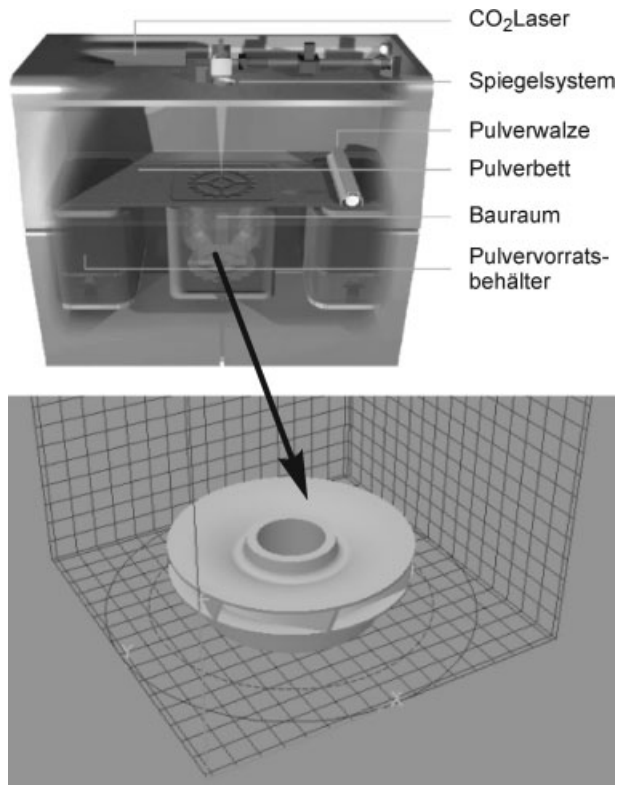
Ausgangspunkt für den Bau des Pumpenlaufra-des ist das in Abb. 6 dargestellte 3D-CAD-Modell. Als ein-heitliches Datenformat für alle Rapid Prototyping-Anlagen gilt das STL-Format, d. h. das Modell wird in eine Vielzahl von Dreiecken zerlegt. Nach dem Einlesen des STL-File werden je nach der Bauteilgröße und -komplexität sowie nach dem verwendeten Werkstoff entsprechende technolo-gische Parameter an der Anlage eingestellt (s. Tab. 2).

Zunächst wurde als Werkstoff Polyamid (Dura-Form™ PA) verwendet. Er zeichnet sich durch sehr gute mechanische, thermische sowie physikalische Eigenschaften aus und erfüllt die Anforderungen, die an den Prototypen des Pumpenlaufrades gestellt werden. Die erreichbare Ober-flächenrauheit beträgt $Ra = 9 \mu m$ und durch Nacharbeit, d. h. Aufbringen eines Füllers und anschließendes Schleifen, sind Oberflächenrauheiten von ca. $Ra < 0,1 \mu m$ erzielbar.

Tabelle 2.
Technische Daten der Laser-Sinterstation.

Fläche des Bauraums:	305 x 305 mm ²
Bauteilgröße:	215 x 215 x 64,25 mm ³
Werkstoff:	Polyamid
Part Bed Temperatur:	171 °C
Feed Heater Temperatur:	85 °C
Piston Heater Temperatur:	130 °C
Fill Laser Leistung:	4,5 W
Outline Laser Leistung:	2,7 W

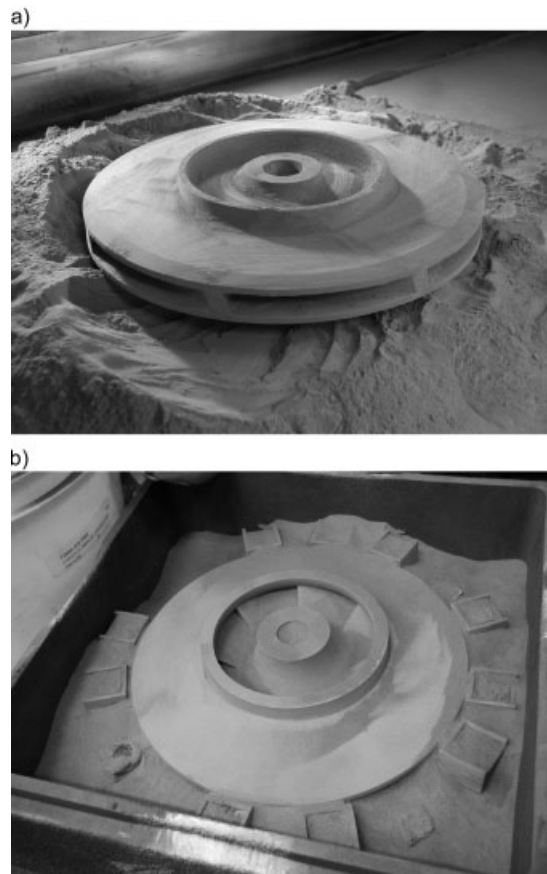
Abbildung 11.
Bauraum der Rapid Prototyping-Maschine.



In Abb. 11 ist der Bauraum der Anlage mit den entsprechenden Komponenten sowie der maximal möglichen Bauteilgröße dargestellt. Nach dem Start der Anlage senkt sich der mittlere Behälter um 0,1 mm ab, und aus dem äußeren Pulvervorratsbehälter wird mittels der Pulverwalze der Werkstoff über die Arbeitsfläche verteilt. Der Laser fährt danach die Kontur ab, die in dieser Schicht angeschmolzen werden soll. Im Anschluss senkt sich der mittlere Behälter wieder um 0,1 mm ab, und der Vorgang wiederholt sich bis der Prototyp fertig gestellt ist. Für 5 mm Bauhöhe des Pumpenlaufrades benötigte die Anlage ca. 60 Minuten. Somit war der Prototyp nach ca. 10 Stunden fertig, konnte aus der Anlage entnommen und vom restlich anhaftenden Werkstoffpulver getrennt werden. Der Prototyp entspricht in seinen Daten dem Modell und die Oberflächenqualität den oben aufgeführten Werten.

Für höhere mechanische Anforderungen ist die Herstellung von Prototypen aus Metall mit der gleichen Anlage möglich. Der dafür durchzuführende Herstellprozess ist ungleich aufwendiger und zeitintensiver. Es wird zunächst ein „Grünling“ aus Stahlpulver (FeCr) in der Maschine gesintert (s. Abb. 12a). Dieser Prozess findet ebenfalls unter einer Stickstoffatmosphäre statt, um Oxidationsreaktionen zu vermeiden. Nach dem Entfernen des überschüssigen Pulvers aus allen Strömungskanälen muss das äußerst zerbrechliche Bauteil in einem weiteren Schritt mit Bronze infiltriert werden. Dazu wird es in einem Brennofen positioniert und über Hilfsgeometrien mit der als Infiltrationsmaterial vorgesehenen Bronze versorgt. Wichtig ist dabei, die Geometrie mittels Al_2O_3 -Pulver zu umgeben, um sie zu stützen. Anschließend wird der Ofen mit einem Temperaturgradienten von ca. 100 °C/h auf 1100 °C gebracht und diese

Abbildung 12.
Metalllaufrad: a) „Grünling“ aus Stahlpulver, b) infiltriertes Laufrad.



Temperatur über 5 Stunden gehalten. Das nach dem Ofenprozess infiltrierte Laufrad ist in Abb. 12b zu sehen. Die gesamte Bauzeit setzt sich aus der Sinterzeit (ca. 50 Stunden), der Zeit des Ofenprozesses sowie weiteren Rüstzeiten zusammen. Die Bauteilgenauigkeit beträgt bei einem Außendurchmesser von ca. 260 mm etwa 2 mm. Die Oberflächen haben eine deutlich höhere Qualität als beim Sandguss.

Es ist erstmalig gelungen, ein derart komplexes und von den Abmessungen für das Rapid Prototyping großes Bauteil aus Metall mittels dieser Technik herzustellen (s. Abb. 13). Weiterführende Arbeiten auf dem Gebiet des Metallsinterns müssen sich mit der Erhöhung der Prozesssicherheit sowie der Optimierung der technologischen Parameter sowohl für den Rapid Prototyping-Prozess als auch mit dem im Anschluss stattfindenden Infiltrationsprozess beschäftigen.

Der Fertigungsaufwand für die spanende Fertigung eines Pumpenlaufrades ist auch unter Nutzung modernster Technologien (HSC-Fräsen mit Schnittgeschwindigkeiten von über 900 m/min) wesentlich höher als mittels Rapid Prototyping. So betrug in dem hier vorliegenden Fall der zeitliche Aufwand für die Erstellung des NC-Programmes und die Fertigung der Radscheibe mit den Laufradschaufeln und der Deckscheibe sowie für die Montage dieser Bauteile die doppelte Zeit im Vergleich zu dem als ein Teil mittels Rapid Prototyping gefertigten Pumpenlaufrad aus Metall.

Die Planung und Vorbereitung der Serienfertigung hängt naturgemäß sehr stark von dem vorgesehenen

Abbildung 13.
Schnitt durch das mittels Rapid Prototyping gefertigte Laufrad.

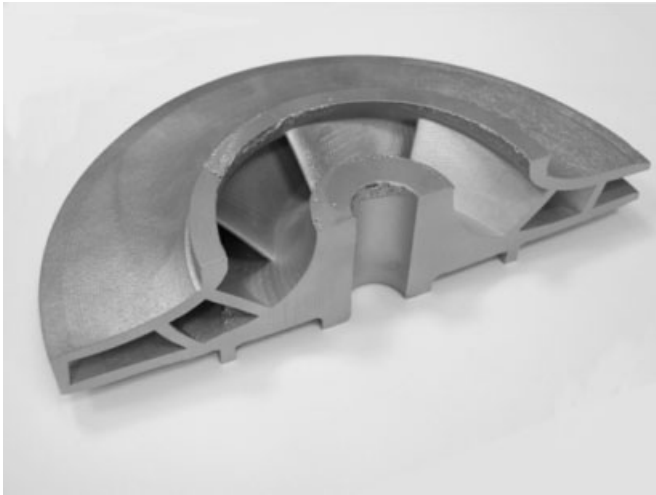


Abbildung 14.
Spanende Fertigung eines Kunststofflaufrades [24].



Fertigungsverfahren für ein Produkt ab. Eine sinnvolle Möglichkeit bei zu erwartenden hohen Stückzahlen ist das Gießen, während bei kleinen Stückzahlen bzw. Einzelfertigung die spanende Bearbeitung die sinnvolle Alternative darstellt. Für beide Produktionsverfahren stellen die 3D-Konstruktionsdaten die geeignete Basis dar. Im einfachsten Fall können direkt 2D-Werkstattzeichnungen daraus abgeleitet werden. Um jedoch mögliche Fehlinterpretationen durch Mitarbeiter zu vermeiden, sollte die Prozesskette den Fertigungsprozess einschließen. Für das Gießen gelingt dies durch Verwendung von Softwaretools, die es ermöglichen, die Produktdaten in entsprechende Modelleinrichtungen umzusetzen [22, 23].

Bei der spanenden Herstellung des Laufrades wird die 3D-Datenbasis genutzt, um auf mehrachsigen Maschinen die Radscheibe mit den Laufradschaufeln aus dem Vollen zu fräsen und anschließend die separat gefertigte Deckscheibe durch Fügen mit dem Laufrad zu verbinden. In Abb. 14 wird diese Art der Fertigung an einem Kunststofflaufrad gezeigt.

7 Experimentelle Untersuchung

Eine experimentelle Überprüfung aller Eigenschaften des Laufrades ist wünschenswert, aber nicht für alle Werte möglich. Die von den meisten Pumpenlaufrädern ohnehin weit übertroffenen Festigkeitsanforderungen lassen sich experimentell nicht sinnvoll ermitteln. Schwingungsuntersuchungen ergeben nur im Zusammenhang mit der tatsächlichen Anordnung auf der Welle bzw. im Betrieb realistische Aussagen. Die geforderten hydrodynamischen Eigenschaften müssen aber in jedem Fall experimentell nachgewiesen werden.

In einer Anordnung als einstufige Pumpe mit zugehöriger Leitbeschaufelung lassen sich die integralen Stufenwerte Volumenstrom, Förderhöhe, Wirkungsgrad und Drehzahl auf einfache Weise bestimmen. Üblicherweise werden die gemessene Förderhöhe und der Wirkungsgrad über dem geförderten Volumenstrom bei der Auslegungsdrehzahl aufgetragen. Insbesondere die Form der Förderhöhenkennlinie sowie die Förderhöhe und der Wirkungsgrad beim Auslegungsvolumenstrom sind wichtige Indikatoren für eine treffende Auslegung des Laufrades.

8 Ausblick

An dem vorgestellten Beispiel eines Kreiselpumpenlaufrades werden die Vorteile einer komplett virtuellen Produktentwicklung beschrieben. Es ist gelungen, beginnend von der strömungstechnischen Auslegungsberechnung, die die Rad- und Deckscheibenkontur bestimmt, über die Ermittlung der Schaufelgeometrie, die Prototypengestaltung bis hin zur Produktion eine CAx-Prozesskette zu realisieren. Aufgrund der komplexen Geometrie kommen fast ausschließlich 3D-Methoden zum Einsatz.

Durch die Gestaltung individueller Verknüpfungsprogramme, die einen effizienten Einsatz der kommerziellen Berechnungs- und Konstruktionssoftware ermöglichen, und durch die Integration umfangreichen Fachwissens in das CAx-System wird ein hoher Automatisierungsgrad erreicht. Damit lassen sich virtuelle Produktstudien bis zur Fertigungsvorbereitung durch parametergesteuerte Änderungen mit relativ geringem Aufwand durchführen.

Als aufwendig sind zur Zeit noch die rechenzeit- und speicherplatzintensiven 3D-Strömungssimulationen anzusehen. Auch eine gezielte Auswertung der großen Datenmengen sowie die Ableitung notwendiger konstruktiver Änderungen aus den Simulationsergebnissen lässt sich nur mit der entsprechenden Erfahrung durchführen. Die absehbare Steigerung der verfügbaren Rechenleistung und des Speicherplatzes neuer Computergenerationen lässt es zukünftig möglich erscheinen, durch Anwendung einer dem Optimierungsprozess überlagerten Strategie die Entwicklung eines speziellen Produktes, wie es z. B. ein Kreiselpumpenlaufrad darstellt, automatisch durchzuführen.

Der ganzheitliche Ansatz von der strömungstechnischen Auslegungsberechnung über die Integration von

Fachwissen in ein CAx-System bis hin zur Fertigung von Prototypen mittels Rapid Prototyping ermöglicht zukünftig die Erschließung weiterer Potentiale bei der Pumpenentwicklung.

Eingegangen am 28. August 2002 [B 6125]

Formelzeichen

A	[m ²]	Fläche des Schaufelkanals
b	[m]	Schaufelkanalbreite
H	[m]	Förderhöhe
c	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit
Δh	[m ² /s ²]	Enthalpieänderung
k, K	[-]	Konstante
M	[-]	bezogene Meridiankoordinate (= m/m_{\max})
n	[s ⁻¹]	Drehfrequenz
r	[m]	Radius
u	[m/s]	Umfangsgeschwindigkeit
\dot{V}	[m ³ /s]	Volumenstrom
w	[m/s]	Relativgeschwindigkeit
z	[m]	axiale Koordinate

griechische Buchstaben

α	[Grad]	Absolutströmungswinkel
β	[Grad]	Relativströmungswinkel
Δs	[m]	Schaufeldicke
φ	[-]	Durchflusskennziffer
η	[-]	Wirkungsgrad
Θ	[Grad]	Umschlingungswinkel
ν	[-]	Radienverhältnis

Indices

1, 2	Eintritt, Austritt
Ausl.	Auslegungsgröße
D	Deckscheibe
m	Meridiankomponente
max	maximal
R	Radscheibe
t	total
u	Umfangskomponente
∞	unendlich

Literatur

- [1] Technische Unterlagen, RITZ PUMPENFABRIK GMBH & Co. KG, Schwäbisch Gmünd 2001.
- [2] S. Vajna, *VDI-Ber.* 2001, Nr. 1614, 3.
- [3] H.-J. Bullinger, J. Warschat, A. Baur, T. Potinecke, *VDI-Ber.* 2001, Nr. 1614, 37.

- [4] P. Dietz, M. Tawil, D. Trenke, *VDI-Ber.* 2001, Nr. 1614, 113.
- [5] F.-K. Benra, P. Köhler, G. Witt, *VDI-Ber.* 2001, Nr. 1614, 313.
- [6] ebm-Werke: Vom Modellbau zum virtuellen Prototypen, *Konstruktionspraxis* 2002, Nr. 2, 24.
- [7] F.-K. Benra, Das Pumpenlaufrad aus dem Computer, *Process (Wuerzburg, Ger.)* 2001, Nr. 11, 42.
- [8] S. Bross, S. Baumgarten, Computergestützte Simulation, *MM-Industriemagazin* 2001, Nr. 49, 40.
- [9] W. Fister, *Fluidenergiemaschinen*, Bd. 2, Springer Verlag, Berlin 1986.
- [10] R. H. Aungier, *Centrifugal Compressor Stage Preliminary Aerodynamic Design and Component Sizing*, ASME 95-GT-78, Washington 1978.
- [11] H. Simon, Entwicklung einer Standard-Laufradbaureihe mit räumlich verwundenen, rückwärtsgekrümmten Schaufeln für stationäre Radialverdichter, *VDI-Z* 1977, 119, 121.
- [12] D. Japikse, W. D. Marscher, R. B. Furst, *Centrifugal Pump Design and Performance*, Concepts ETI Inc., White River Jct. 1997.
- [13] P. Köhler, *Moderne Konstruktionsmethoden im Maschinenbau*, Vogel-Verlag, Würzburg 2002.
- [14] P. Köhler, R. Hoffmann, M. Köhler, *Pro/ENGINEER-Praktikum*, Vieweg-Verlag, Wiesbaden 2001.
- [15] H. Oertel, E. Laurien, *Numerische Strömungsmechanik*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1995.
- [16] CFX-Turbogrid, Version 1.6, Software Documentation, *User Manual*, AEA Technology Engineering Software Ltd., Waterloo 2001.
- [17] CFX-TASCflow, Version 2.11, Computational Fluid Dynamics Software, *User Documentation*, AEA Technology Engineering Software Ltd., Waterloo 2001.
- [18] P. F. Galpin, R. Brobert, B. R. Hutchinson, Three-Dimensional Navier-Stokes Predictions of Steady State Rotor/Stator Interaction with Pitch Change, *Proc. 3rd Annual Conference of the CFD Society of Canada*, Vol. I, Banff 1995.
- [19] F.-K. Benra, *World Pumps* 2001, No. 416, 48.
- [20] A. Gebhardt, *Rapid Prototyping*, Carl Hanser Verlag, München, Wien 2000.
- [21] M. Meindl, A. Müller, Tempomacher, *MM-Industriemagazin* 2002, Nr. 3, 40.
- [22] K. Conrad, G. Witt u. a., *Taschenbuch der Werkzeugmaschinen*, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München 2002.
- [23] R. Simmonds, Schnelle Realisierung von Metallgussteilen bei MCP, *Rapid* 2001, Amsterdam, 28./30. Mai 2001.
- [24] Technische Unterlagen, MUNSCH CHEMIE-PUMPEN GMBH, Ransbach-Baumbach 2002.