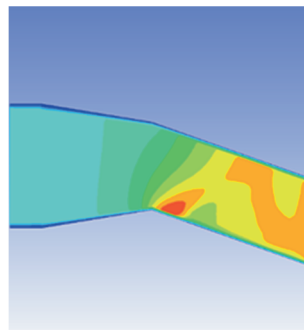


## Untersuchung der Merkmale konvergenter und konvergent-divergenter Düsenköpfe von Dampfturbinen mit kreisförmigen und quadratischen Querschnitten

Isranuri, I.; Alfisyahrin, R. N.; Prasoso, S. M.



Das Ziel des Artikels ist es, zu untersuchen, welches Format von Düsen mit kreisförmigem und quadratischem Querschnitt besser für den Einsatz in zweireihigen einstufigen Dampfturbinen geeignet ist. In dieser Arbeit werden Simulationen mit ANSYS sowie eine Analyse verschiedener Düsentypen mit unterschiedlichen Abmessungen mit kreisförmigen oder quadratischen Querschnitten durchgeführt. Die Studie wurde für Dampfturbinen von 800 kW und 1200 kW durchgeführt. Die Modelle für beide Düsentypen wurden auf der Grundlage von Abmessungen und technischen Daten erstellt, die aus der Palmölindustrie und aus Katalogen stammen. Durch Simulation der Geschwindigkeits-, Druck- und Temperaturverteilung werden die Eigenschaften der einzelnen Testmodelle betrachtet und verglichen.

The aim of this article is to investigate which nozzle format, with circular and square cross-sections, is better suited for use in two-row, single-stage steam turbines. This paper presents simulations using ANSYS and an analysis of various nozzle types with different dimensions featuring circular or square cross-sections. The study was conducted for steam turbines of 800 kW and 1200 kW. The models for both nozzle types were created based on dimensions and technical data sourced from the palm oil industry and from catalogues. By simulating the velocity, pressure, and temperature distributions, the characteristics of each test model are examined and compared.

### Einführung

Dampfturbinen sind Antriebsmaschinen, die in verschiedenen Industriezweigen zum Antrieb von Generatoren zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Kleine und mittelgroße Dampfturbinen werden in vielen Industriezweigen eingesetzt, insbesondere in der Palmölindustrie, z. B. in kohlebefeuernden Kraftwerken oder in Biomassekraftwerken (Abfälle von Palmschalen und -fasern). Die Dampfturbine dient dazu, die potenzielle Energie des Dampfes in kinetische Energie umzuwandeln, und die kinetische Energie treibt später die Generatorwelle an. Um die Leistung zu erhöhen, werden zahlreiche Entwicklungen an den Teilen der Dampfturbine vorgenommen. Eine der wichtigsten Komponenten hierbei ist die

Düse. Es gibt verschiedene Formen von Düsen, die heute in der Industrie verwendet werden, z. B. konvergente Düsen und konvergent-divergente Düsen.

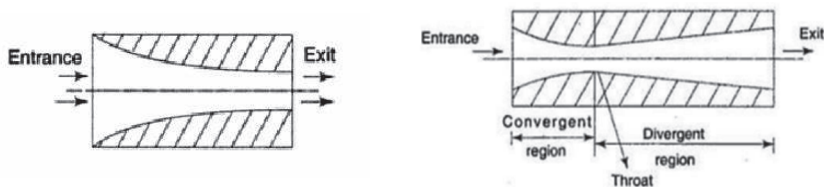
### **Düse und Düsentyp der Dampfturbine**

Die Düse ist Teil einer Kraftmaschine, die die potenzielle Energie des Dampfes in kinetische Energie umwandelt. Düsen werden verwendet, um die Durchflussmenge, Geschwindigkeit, Richtung, Masse, Form und/oder den Druck des aus der Düse austretenden Stroms zu steuern. Nach dem Durchgang durch die Düse erhöht sich die Geschwindigkeit der Flüssigkeit auf Kosten ihrer Druckenergie.

Es gibt 2 Arten von Düsen, die üblicherweise in Dampfturbinen verwendet werden, nämlich:

- Konvergente Düse
- Konvergent-divergente Düse

Eine konvergente Düse ist eine Düse, deren Querschnittsfläche kontinuierlich abnimmt, bis sie die Düsenspitze erreicht, während eine divergente konvergente Düse eine Düse ist, deren Querschnittsfläche bis zu einem bestimmten Teil der Düse abnimmt und dann wieder zunimmt, wobei dieser Übergangsbereich als Düsens Hals bezeichnet wird.



(a) Konvergente Düse

(b) Konvergent-divergente Düse

**Abbildung 1:** Typ der Düsen

### **Computational Fluid Dynamics (CFD) Annäherung**

Die numerische Strömungsmechanik (CFD) ist ein Teilgebiet der Aerodynamik/Fluidmechanik, bei dem Informationen zum betrachteten System aus Berechnungen mit Hilfe von numerischen Analysen gewonnen werden, um Strömungsprobleme zu lösen und zu analysieren. CFD kann als ein technisches Werkzeug bezeichnet werden, das neben Experimenten in der Entwicklungsphase unterstützend genutzt werden kann.

Eine Systemanalyse mittels CFD besteht aus mehreren Schritten:

- Identifizierung des Problems
- Vorverarbeitung
- Lösungen
- Nachbearbeitung

### Simulation mit Ansys Fluent

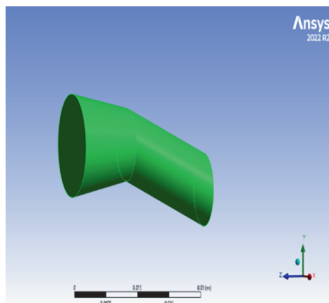
Die Durchführung einer Simulation mit Ansys Fluent erfolgt in mehreren Schritten:

I. Zeichnung der Geometrien mit den folgenden Spezifikationen:

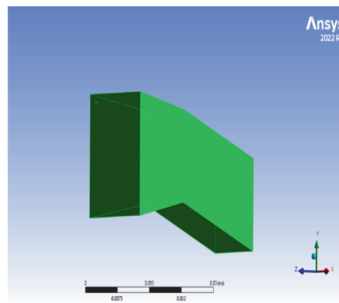
**Tabelle 1:** Düsenspezifikationen

Parameter	800 kW Turbine	1200 kW Turbine
$d_{in}$ (Durchmesser Einlass)	16,88 mm	20,66 mm
$d_{out}$ (Durchmesser des Auslasses)	12,65 mm	15,49 mm
Düsenlänge	34 mm	34 mm
Konvergentes Gefälle des Düsenauslasses	21°/0°	21°/0°

Woraus sich folgende CAD-Modelle ergeben:

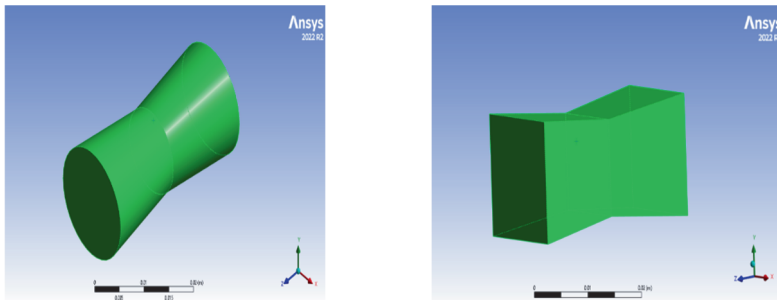


(a) Konvergente Runddüse



(b) Konvergente quadratische Düse

**Abbildung 2:** Typen konvergenter Düsen mit Auslassgefälle



(a) Konvergent-divergente Runddüse      (b) Konvergent-divergente quadratische Düse

**Abbildung 3:** Arten von konvergent-divergenten Düsen ohne Auslassgefälle

Für die einstufige Dampfturbine mit 800 kW und 1200 kW gibt es vier Musterformen mit unterschiedlichen Düsenabmessungen. Die Abmessungen sind in der Tabelle 1 mit den Düsenspezifikationen für die acht zu simulierenden Exemplare aufgeführt.

II. Bildung eines Netzes auf der erstellten Geometrie, wobei die Maschenweite hier auf 0,8 mm festgelegt wird.

III. Erstellen der Simulationsdaten, bei denen das Fluid überhitzter Dampf und das feste Material SS-403 ist. Die Eintrittsgeschwindigkeit des Dampfes beträgt 189,8 m/s bei einem Druck von 20 bar und einer Eintrittstemperatur von 160 °C.

IV. Initialisierungs- und Berechnungsprozess

V. Analyse der Simulationsergebnisse durch Betrachtung der Durchschnittswerte von Geschwindigkeit, Druck und Temperatur am Auslass.

## Ergebnis und Diskussion

Die folgende Analyse zeigt die Modellierung von Geschwindigkeit, Druck und Temperatur an jeder Düse mit quadratischem oder rundem Querschnitt mit konvergenten und divergent konvergenten Typen. Die Geometrie der verwendeten Düse entspricht der Geometrie der Düse an den 800 kW- und 1200 kW-Dampfturbinen.

### Konvergente Düsen, 800 kW

Die Geschwindigkeits-, Druck- und Temperaturkonturen an den konvergenten 800 kW Düsen sind in den folgenden Abbildungen 4 bis 9 dargestellt.

Aus den Konturen links ist ersichtlich, dass der Höchstwert der Geschwindigkeit des in der 800 kW-Runddüse strömenden Dampfes 806,3 m/s beträgt, während die Durchschnittsgeschwindigkeit am Düsenaustritt 690,37 m/s beträgt. Der

Eingangsdruck beträgt 20 bar. Bei Ausströmung des Dampfes, sinkt der Druck auf 6,93 bar. Der Höchstwert der Temperatur des in die Düse strömenden Dampfes beträgt 535,5 K, während die durchschnittliche Temperatur am Düsenaustritt 444,606 K beträgt.

Aus der obigen Kontur ist ersichtlich, dass der Höchstwert der Geschwindigkeit des in der 800 kW-quadrischen Düse strömenden Dampfes 746 m/s beträgt, während die Durchschnittsgeschwindigkeit am Düsenausgang 652,234 m/s beträgt. Der Eingangsdruck beträgt 20 bar. Bei Ausströmung des Dampfes, sinkt der Druck auf 7,7 bar. Der Höchstwert der Temperatur des in die Düse strömenden Dampfes beträgt 535,6 K, während die durchschnittliche Temperatur am Düsenaustritt 454,69 K.

Rundstrahldüse

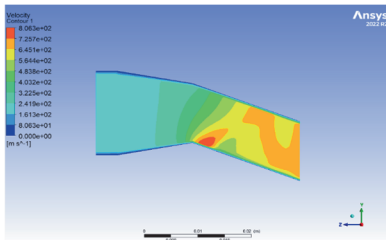


Abb. 4: Geschwindigkeitskontur

Quadratische Düse

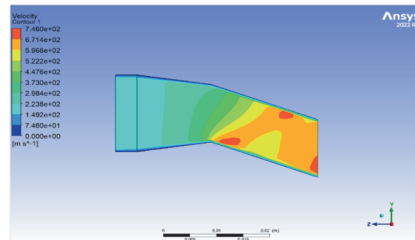


Abb. 5: Geschwindigkeitskontur

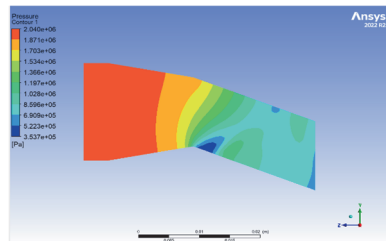


Abb. 6: Druckkontur

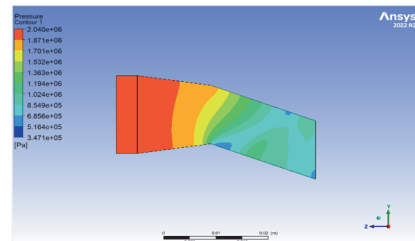


Abb. 7: Druckkontur

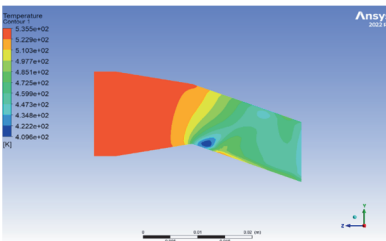


Abb. 8: Temperaturkontur

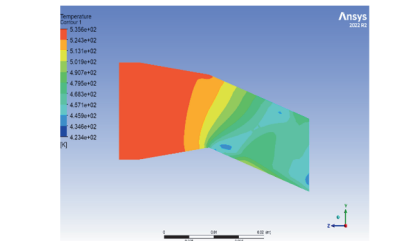


Abb. 9: Temperaturkontur

### Konvergente Düsen, 1200 kW

Die Geschwindigkeits-, Druck- und Temperaturkonturen an den konvergenten 1200 kW Düsen sind in den folgenden Abbildungen 10 bis 15 dargestellt.

Rundstrahldüse

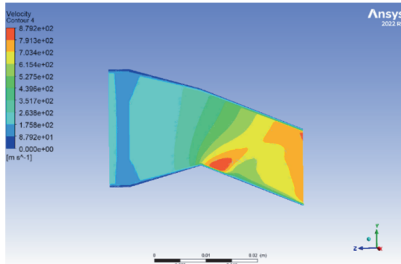


Abb. 10: Geschwindigkeitskontur

Quadratische Düse

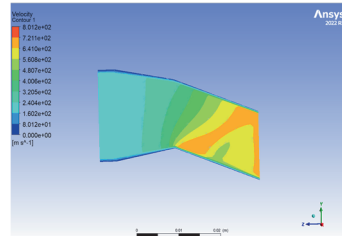


Abb. 11: Geschwindigkeitskontur

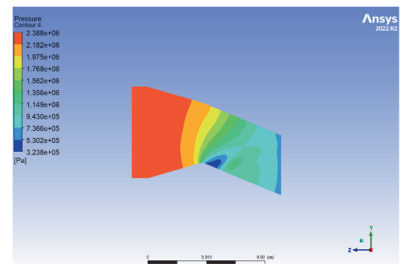


Abb. 12: Druckkontur

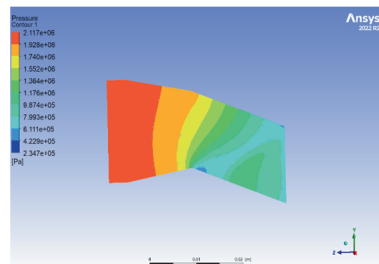


Abb. 13: Druckkontur

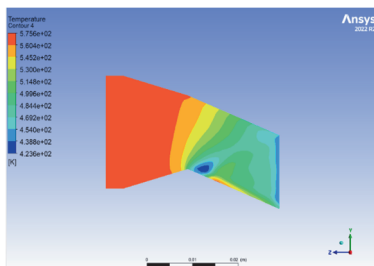


Abb. 14: Temperaturkontur

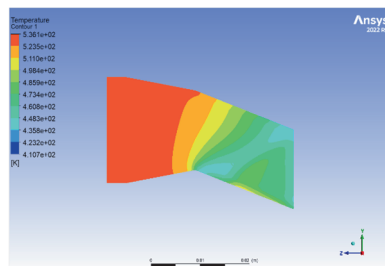


Abb. 15: Temperaturkontur

Aus den obigen Konturen links ist ersichtlich, dass der Höchstwert der Geschwindigkeit des in der Runddüse strömenden Dampfes 879,2 m/s beträgt, während die Durchschnittsgeschwindigkeit am Düsenausgang 772,151 m/s beträgt. Der Eingangsdruck beträgt 20 bar. Bei Ausströmung des Dampfes, sinkt der Druck auf 6,81671 bar. Der Höchstwert der Temperatur des in die Düse strömenden

Dampfes beträgt 575,6 K, während die durchschnittliche Temperatur am Düsenaustritt 446,646 K beträgt.

Aus den obigen Konturen rechts ist ersichtlich, dass der Höchstwert der Geschwindigkeit des in der quadratischen Düse strömenden Dampfes 801,2 m/s beträgt, die Durchschnittsgeschwindigkeit am Düsenaustritt beträgt 672,164 m/s. Der Eingangsdruck beträgt 20 bar. Bei Ausströmung des Dampfes, sinkt der Druck auf 7,39 bar. Der Höchstwert der Temperatur des in die Düse strömenden Dampfes beträgt 536,1 K, während die durchschnittliche Temperatur am Düsenaustritt 449,612 K beträgt.

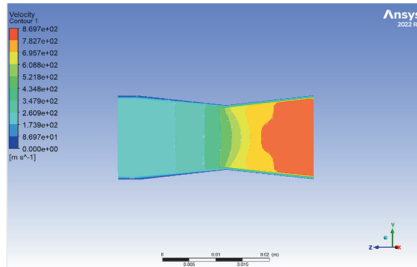
### **Konvergent-Divergent-Düsen, 800 kW**

Die Konturen der Geschwindigkeit, des Drucks und der Temperatur an der konvergenten divergenten 800 kW Düsen sind in den folgenden Abbildungen 16 bis 21 dargestellt.

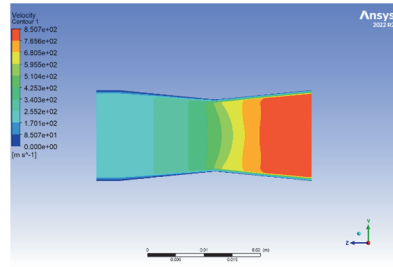
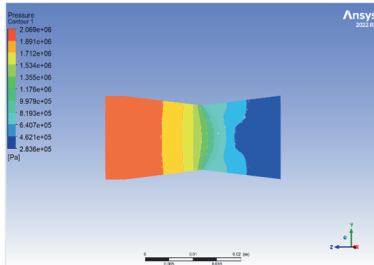
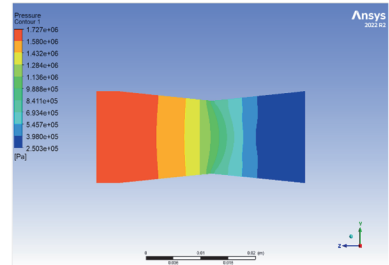
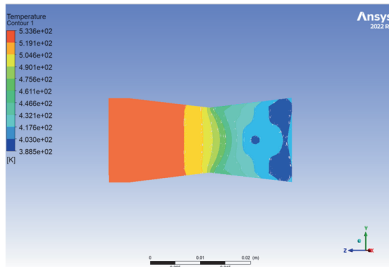
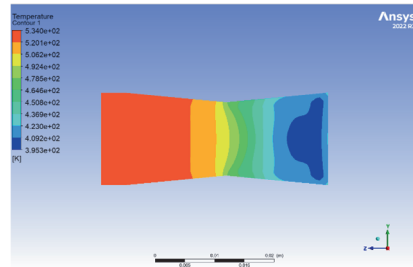
Aus den Konturen links ist ersichtlich, dass der Höchstwert der Geschwindigkeit des in der Düse strömenden Dampfes 869,7 m/s beträgt, während die Durchschnittsgeschwindigkeit am Düsenausgang 827,742 m/s beträgt. Der Eingangsdruck beträgt 20 bar. Bei Ausströmung des Dampfes, sinkt der Druck auf 3,34 bar. Der Höchstwert der Temperatur des in die Düse strömenden Dampfes beträgt 533,6 K, während die durchschnittliche Temperatur am Düsenaustritt 405,402 K beträgt.

Aus den Konturen rechts ist ersichtlich, dass der Höchstwert der Geschwindigkeit des in der Düse strömenden Dampfes 850,7 m/s beträgt, während die Durchschnittsgeschwindigkeit am Düsenaustritt 788,107 m/s beträgt. Der Eingangsdruck beträgt 20 bar. Bei Ausströmung des Dampfes, sinkt der Druck auf 3,137 bar. Der Höchstwert der Temperatur des in die Düse strömenden Dampfes beträgt 534 K, während die durchschnittliche Temperatur am Düsenaustritt 418,527 K beträgt.

Rundstrahldüse

**Abb. 16:** Geschwindigkeitskontur

Quadratische Düse

**Abb. 17:** Geschwindigkeitskontur**Abb. 18:** Druckkontur**Abb. 19:** Druckkontur**Abb. 20:** Temperaturkontur**Abb. 21:** Temperaturkontur

### Konvergent-Divergent-Düsen, 1200 kW

Die Geschwindigkeits-, Druck- und Temperaturkonturen der konvergent-divergenten 1200 kW Düsen sind in den folgenden Abbildungen 22 bis 27 dargestellt.



Rundstrahldüse

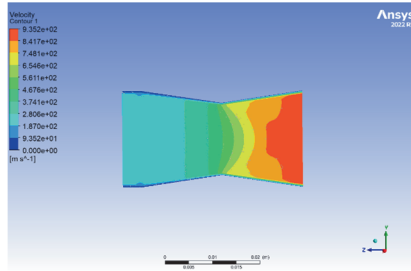


Abb. 22: Geschwindigkeitskontur

Quadratische Düse

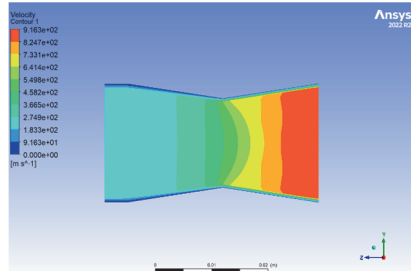


Abb. 23: Geschwindigkeitskontur

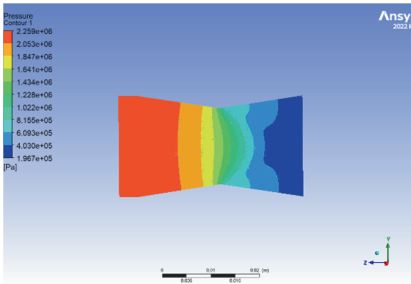


Abb. 24: Druckkontur

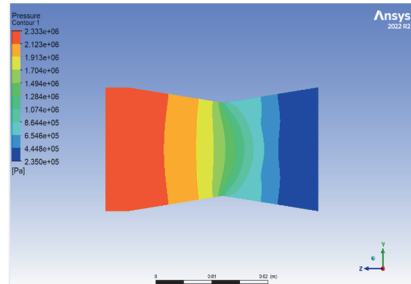


Abb. 25: Druckkontur

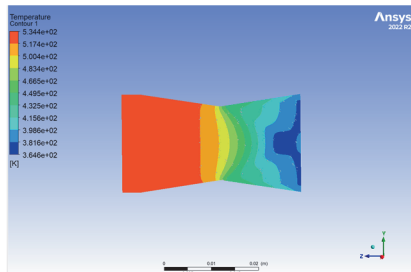


Abb. 26: Temperaturkontur

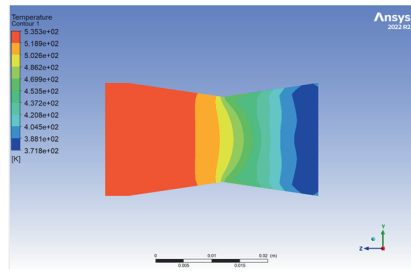


Abb. 27: Temperaturkontur

Aus den obigen Konturen links ist ersichtlich, dass der Höchstwert der Geschwindigkeit des in der Düse strömenden Dampfes 935,2 m/s beträgt, während die Durchschnittsgeschwindigkeit am Düsenaustritt 890,303 m/s beträgt. Der Eingangsdruck beträgt 20 bar. Bei Ausströmung des Dampfes, sinkt der Druck auf 2,695 bar. Der Höchstwert der Temperatur des in die Düse strömenden Dampfes beträgt 534,4 K, während die durchschnittliche Temperatur am Düsenaustritt 381,342 K beträgt.

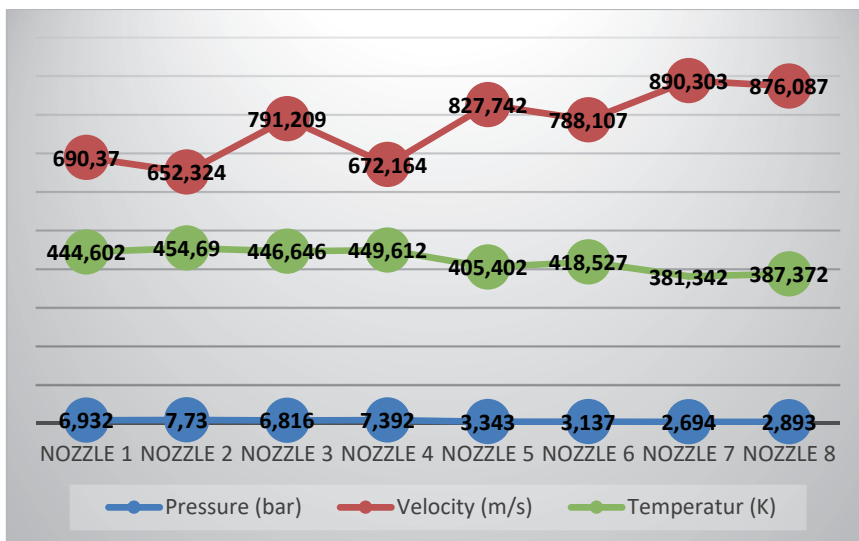
Aus den obigen Konturen rechts ist ersichtlich, dass der Höchstwert der Geschwindigkeit des in der Düse strömenden Dampfes 916,3 m/s beträgt, während die Durchschnittsgeschwindigkeit am Düsenaustritt 876,087 m/s beträgt. Der Eingangsdruck beträgt 20 bar. Bei Ausströmung des Dampfes, sinkt der Druck auf 2,893 bar. Der Höchstwert der Temperatur des in die Düse strömenden Dampfes beträgt 535,3 K, während die durchschnittliche Temperatur am Düsenaustritt 387,372 K beträgt.

Für den folgenden tabellarischen Vergleich sind die betrachteten Modelle in ihrer Bearbeitungsreihenfolge durchnummeriert, wie in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2:** Vergleichende Ergebnisse der durchschnittlichen Auslaufdüse

Nr.	Typen von Düsen	Druck [bar]	Geschwindigkeit [m/s]	Temperatur [K]
1	Konvergent kreisförmig 800 kW	6.932	690.37	444.602
2	Konvergentes Quadrat 800 kW	7.730	652.324	454.690
3	Konvergent kreisförmig 1200 kW	6.816	791.209	446.646
4	Konvergentes Quadrat 1200 kW	7.392	672.164	449.612
5	Konvergent-Divergent Kreisförmig 800 kW	3.343	827.742	405.402
6	Konvergent-Divergent Quadrat 800 kW	3.137	788.107	418.527
7	Konvergent-Divergent Kreisförmig 1200 kW	2.694	890.303	381.342
8	Konvergent-Divergent Quadratisch 1200 kW	2.893	876.087	387.372

In Tabelle 2 werden die acht Testmodelle anhand von Druck-, Geschwindigkeits- und Temperaturparametern verglichen. Für die beiden Dampfturbinen ist die beste Düse diejenige mit der höchsten Geschwindigkeit und dem geringsten Temperaturabfall, wie in Abbildung 28 dargestellt. Ein relativ geringer Temperaturabfall und die damit verbundene hohe Auslasstemperatur kann die Dampfqualität in einem stabilen Zustand halten.



**Abbildung 28:** Diagramm durchschnittlicher Druck, Geschwindigkeit und Temperatur der Auslassdüsen

Von den acht Versuchsmodellen sind die Düsen 3 und 7 mit kreisförmigem Querschnitt relativ gut geeignet, wobei die konvergent-divergente Düse 7, die höchste Geschwindigkeit von 890,303 m/s hat.

## Zusammenfassung

Auf der Grundlage der durchgeführten Simulation zeigen die Simulationsergebnisse, dass die größte Austrittsdampfgeschwindigkeit bei einer konvergent-divergenten Düse mit einem kreisförmigen Querschnitt bei der 1200 kW-Turbine vorliegt, wo der aus der Düse austretende Dampf eine Geschwindigkeit von 890,3 m/s besitzt. Währenddessen liegt die kleinste Dampfgeschwindigkeit bei einer quadratischen Düse an der 800 kW-Turbine vor, wobei der austretende Dampf eine Geschwindigkeit von 652,3 m/s erreicht. Dies war nach der geltenden Theorie nicht erwartet, was die Auswirkungen der Unterschiede in Querschnitt und Abmessungen auf die Ergebnisse des aus der Düse austretenden Dampfdrucks erkennen lässt.

Der aus den Simulationsergebnissen resultierende Dampfdruck zeigt, dass der größte Dampfdruck bei der 800-kW-Düse mit quadratischem Querschnitt 7,73 bar beträgt, während der kleinste Dampfdruck bei der 1200-kW-Düse mit kreisförmigem konvergent-divergentem Querschnitt bei 2,69 bar liegt. Dies ist auf die Umwandlung von Druck in Geschwindigkeit gemäß den theoretischen Grundsätzen

zurückzuführen, so dass eine 800-kW-Düse mit quadratischem Querschnitt einen höheren Austrittsdampfdruck aufweist.

Die höchste Dampftemperatur, die sich aus den Simulationsergebnissen ergibt, liegt bei 800 kW für eine Düse mit quadratischem Querschnitt bei 454,69 K oder 181,69 °C, während die geringste Dampftemperatur bei 1200 kW für eine kreisförmige, konvergierend-divergierende Düse bei 381,342 K oder 108,34 °C liegt.

## Literatur

- /1/ Ansar Jilani, S.; Phaneendra, V. CVS.: Design and Analysis of Steam Turbine Nozzle, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume 8 Issue 3, p.1162-1166, 2021
- /2/ Mishra, R.; Lohia, D.: CFD Analysis of Convergent and Divergent Nozzle, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume 7 Issue 5, p.7639-7643, 2020
- /3/ Kanakaraju, V.; Suresh, N.; Surendar, E.: Structural and Thermal Analysis of Steam Turbine Casing, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume 5 Issue10, p.1757-1763, 2018
- /4/ Venkateshwar Reddy, B.; Krishnamachary, P. C.; Chakradhar Goud, S.: Impact Analysis of Nozzle Design In Steam Turbines, Anveshana's International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences, Volume 7 Issue 7, p.25-29, 2022
- /5/ Kareem, B.; Ewetumo, T.; Adeyeri, M. K.; Oyetunji, A.; Olatunji, O. E.: Design of Steam Turbine for Electric Power Production Using Heat Energy from Palm Kernel Shell, Journal of Power and Energy Engineering, Volume 6 Issue 11, p.111-125, 2018
- /6/ Fharukh, A. M. G.; Alrobaian, A.; Aabid, A.; Khan, S. A.: Numerical Analysis of Convergent-Divergent Nozzle Using Finite Element Method, International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD), Volume 8 Issue 6, p.373-382, 2018
- /7/ Rai, R.; Khan, D.; Chauhan, V. K.: Flow Analysis in A Convergent-Divergent Nozzle Using CFD, International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering, Volume 4 Issue 2, p.32-34, 2017