

# Hoofdstuk 6

## Turbines

### Doelstellingen

1. De werking van een stoomturbine begrijpen
2. De Brayton cyclus begrijpen
3. Weten welke types stoomturbines er bestaan
4. Weten wat reactiegraad is
5. De ontwerpparameters van een stoomturbine kennen

### 6.1 Gasturbines

In deze paragraaf gaan we praten over de gasturbine en de cyclus, de Brayton-cyclus, die deze machine beschrijft toelichten.

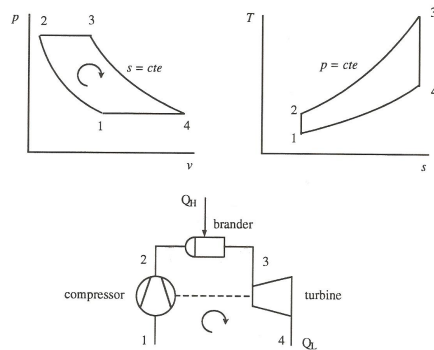
De cyclus werkt als volgt

1. Inkomende lucht wordt gecomprimeerd door een compressor
2. Verbranding van toegevoerde brandstof
3. De opgewarmde en gecomprimeerde lucht geeft zijn energie af in een turbine
4. Afgifte van restwarmte in de omgeving

De compressie en expansie worden verondersteld isentroop te zijn.

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_H}{P_L}^{\frac{n-1}{n}}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{P_H}{P_L}^{\frac{n-1}{n}}$$



Figuur 6.1: Braytoncyclus

De energiebalans

$$E_{in} : h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$$

$$E_{out} : h_1 - h_4 = c_p(T_1 - T_4)$$

Dit geeft voor rendement

$$\eta = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{n-1}{n}}}$$

met

$$\pi = \frac{p_H}{p_L}$$

## 6.2 Stoomturbines

Deze paragraaf zal een overzicht zijn met beknopte uitleg van de werking vermits dit deel eerder thuishoort in de cursus stoom waar dit onderdeel ook uitgebreid aan bod zal komen. Deze paragraaf wordt hier enkel voor de volledigheid geplaatst.

### 6.2.1 Ontwerpparameters

Voor stoomturbines zijn er drie belangrijke ontwerpparameters namelijk de debietscoëfficiënt  $\Phi$ , de werkcoëfficiënt  $\Psi$  en de reactiegraad  $r$ .

Zoals reeds aangehaald bestaat een axiale machine uit een rotor- en een statorschoep.

Op de rotorschoep vindt de energieoverdracht plaats.

Op de statorschoep vindt de energietransformatie plaats.

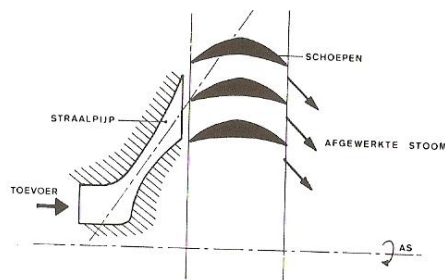
coefficient	stator	rotor
$\Phi$	$\frac{w_a}{u}$	$\frac{c_a}{u}$
$\Psi$	$\frac{\Delta w_u}{u}$	$\frac{\Delta c_u}{u}$
H	$h + \frac{c^2}{2}$	$h + \frac{w^2}{2}$

Waar H staat voor totale enthalpie.

De reactiegraad van een turbine is de verhouding van de drukval in de rotor ten opzichte van deze over rotor en stator samen.

$$r = \frac{\Delta p_R}{\Delta p_t}$$

### 6.2.2 Werking



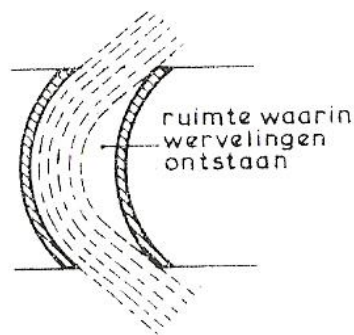
Figuur 6.2: werking van de stoomturbine

In de straalpijp zal de stoom in druk en temperatuur veranderen en de enthalpie zal omgezet worden in kinetische energie. De snelheid van de stoom zal dus toenemen. De stoom zal met grote snelheid de schoepen instromen en arbeid leveren aan de schoepen.

De stoom heeft een relatieve snelheid  $w$  ten overstaande van de schoepen. Het loopwiel draait met rotatiesnelheid  $u$  en de totale snelheid is de vectoriële som van beide.

Er bestaan twee grote klassen van turbines qua werking namelijk de gelijke drukturbine ook impulsturbine genoemd en de overdrukturbine ook reactieturbine genoemd.

### gelijke drukturbine

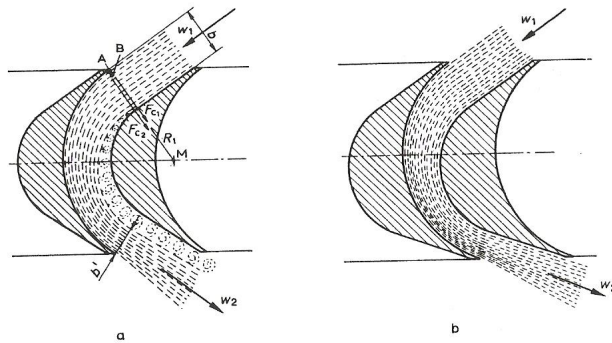


Figuur 6.3: vorm van de schoep van de gelijkde druk turbine

In dit geval zal de energie gehaald worden uit de richtingsverandering van de stoom. De stoom moet niet botsen maar enkel van richting veranderen, trouwens botsingen zijn enkel verlies. Als de schoepen een cirkelvormige kromming geven zal de stoom deze cirkel moeten volgen indien dit stootvrij moet gebeuren. De richtingsverandering moet voor alle deeltjes dezelfde blijven. Aan de rugzijde kunnen de deeltjes iets langer rechtdoor gaan terwijl aan de borstzijde de deeltjes direct van richting moeten veranderen. Om dezelfde richting te behouden moeten deze deeltjes de borstzijde lossen. In de holte die dan gevormd wordt zullen wervelingen optreden en dit moet vermeden worden. Deze leegte wordt opgevuld met materiaal en daarom zijn bij gelijke druk turbines de schoepen in het midden iets dikker.

Nu gaan we eens kijken hoe kracht kan geleverd worden enkel ten gevolge van de richtingsverandering en hiervoor gebruiken we figuur 6.4.

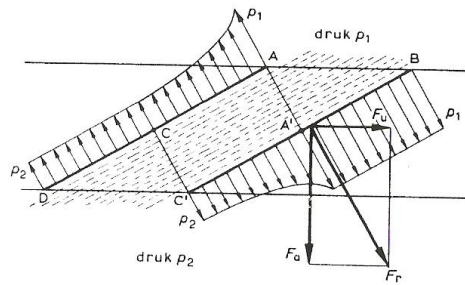
Deeltje A komt als eerste uit de straalbuis en komt in aanraking met de schoepwand. De schoepwand zal deeltje A van richting doen veranderen want dit deeltje moet de wand volgen. Om van richting te veranderen is een kracht nodig en deze wordt door de schoep geleverd. Deze kracht is de centripetale kracht met straal  $R_1$ . (Akte is Reactie dus...) We laten wrijving even buiten beschouwing. Als deeltje B dat niet in aanraking komt met de wand maar wel



Figuur 6.4: gelijke druk principe

met A zal deze A moeten volgen en A zal de kracht dus doorgeven aan B. Dit kan enkel als de druk op A groot genoeg is. Dit geeft dan terug een centripetale kracht doch met en iets kleinere straal  $R_2$ . Dus de kracht op de schoepwand is dan de som van beide voorgaande. Zo moet je de stoomstraal bundel afgaan om tot de totale kracht te komen.

### overdruk turbine

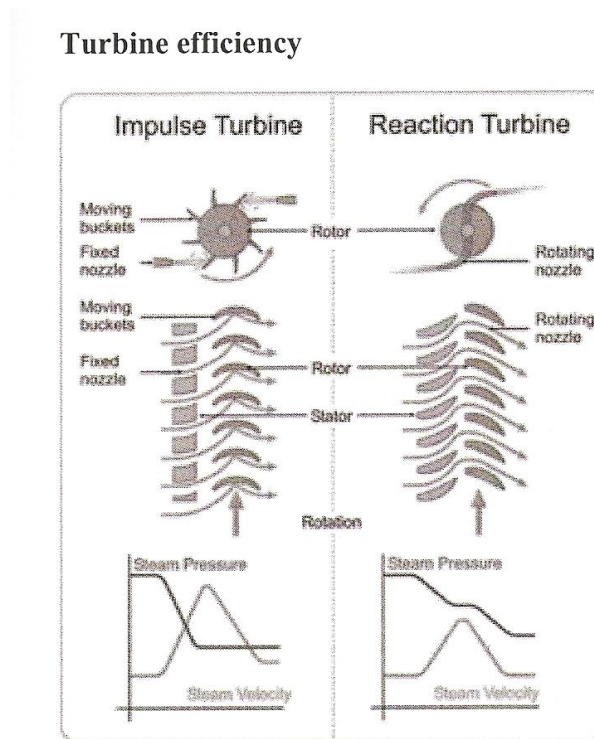


Figuur 6.5: werking overdruk turbine

Bij de overdrukturbine wordt de energie verkregen uit zowel verandering van richting als verandering van snelheid. Als we aannemen dat er geen verliezen zijn en de stroming dus ideaal dan kunnen we de stoomdruk loodrecht op de stromingsrichting constant veronderstellen. Dus in AA' is de druk  $p_1$  en in CC' is deze  $p_2$ . De stoomdruk zal dus veranderen van A tot C en van B tot A'. Aangezien er een drukverschil is zal er ook per oppervlakte eenheid van de schoep een resulterende kracht overblijven. Het is deze kracht die het wiel doet

draaien.

### 6.3 Berekening van het rendement



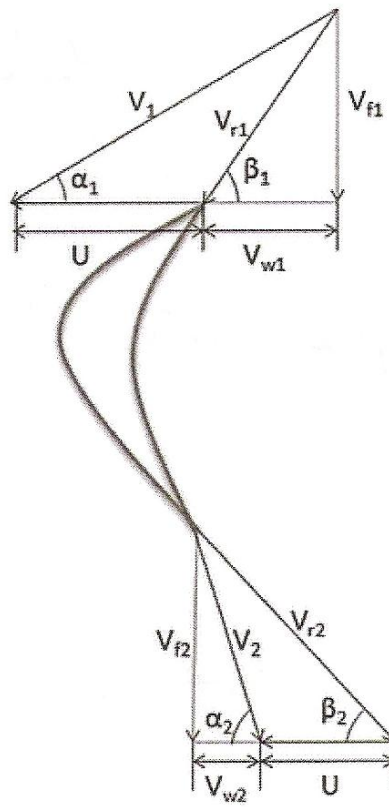
Figuur 6.6: vergelijking impuls-reactieturbine

#### 6.3.1 Actieturbine

de snelheidsvectoren op de tekening stellen het volgende voor (1:in,2:uit)

1.  $v$ : absolute snelheid
2.  $v_f$ : snelheid van de stoom
3.  $v_w$ : relatieve snelheid
4.  $v_r$ : relatieve snelheid
5.  $u$ : rotatiesnelheid dus de sleepsnelheid

Men definieert ook volgende rendementen



Figuur 6.7: snelheidsdriehoeken impulsturbine

1. schoeprendement:  $\eta_b = \frac{2uv_w}{v_1^2}$

dit is de verhouding tussen de arbeid geleverd door de stoom aan de schoep en de kinetische energie van de stoom

2. rendement van een trap (dus rotor en stator):  $\eta_s = \frac{u\Delta v_w}{\Delta h}$

Dit is dus de verhouding tussen de arbeid geleverd aan de rotor en de arbeid geleverd aan de volledige trap.

3. nozzlerendement:  $\eta_n = \frac{v_2^2}{2(h_1 - h_2)}$

$h_1$  is energie aan de ingang van de nozzle en  $h_2$  is de energie aan de uitgang van de nozzle.

Eerst kijken we naar het rendement van rotor. Uit de wet van behoud van impuls (impulsmoment) volgt dat het moment op de schoep is

$$T = \dot{m}(r_2 v_{w2} - r_1 v_{w1})$$

In het geval van impulsturbines wordt gesteld dat  $r_1 = r_2 = r$  dus bekomen we

$$T = \dot{m}r(v_{w2} - v_{w1}) = \dot{m}r\Delta v_w$$

Het geleverde vermogen is per definitie  $W = \omega T$  dus in dit geval

$$W = \omega \dot{m}r\Delta v_w$$

en

$$u = \omega r$$

Het verschil is steeds het verschil in tangentiële componenten van de snelheidsvectoren. De verhouding toegevoerde kinetische energie aan de stoom ten overstaande van de geleverde asarbeid wordt ook bepaald door het schoeprendement dus

$$\eta_b = \frac{2u\dot{m}\Delta v_w}{\dot{m}v_1^2}$$

Nu moeten we dit rendement omzetten in geometrische veranderlijken

$$\Delta v_w = v_{w1} - (-v_{w2}) = v_{w1} + v_{w2}$$

Dit is een vectoriële som van de tangentiële componenten dus  $v_{w2}$  verandert van teken.

$$\Delta v_w = v_{r1} \cos \beta_1 + v_{r2} \cos \beta_2$$

$$\Delta v_w = v_{r1} \cos \beta_1 \left(1 + \frac{v_{r2} \cos \beta_2}{v_{r1} \cos \beta_1}\right)$$

We definiëren

$$\frac{\cos \beta_2}{\cos \beta_1} = c$$

$$\frac{v_{r2}}{v_{r1}} = k$$



Deze k factor geeft een waarde voor de wrijvingsverliezen in de schoepen. Hieruit volgt voor het rendement op een trap

$$\eta_b = \frac{2u(1+kc)(\cos \alpha_1 - \frac{u}{v_1})}{v_1}$$

Dit volgt uit

$$v_{r1} \cos \beta_1 = v_1 \cos \alpha_1 - u$$

Stel  $\rho = \frac{u}{v_1}$  Het maximale rendement wordt dan bereikt voor

$$\frac{d\eta_b}{d\rho} = 0$$

en dat is voor

$$\rho = \frac{\cos \alpha_1}{2}$$

Het maximale rendement wordt dan

$$\eta_{bmax} = \frac{\cos^2 \alpha_1 (1+kc)}{2}$$

Indien  $\beta_1 = \beta_2$  en er geen wrijvingsverlies is wordt dit rendement  $\cos^2 \alpha_1$  (want  $k=c=1$ )

Terloops gaan we nog eens kijken naar de volledige trap.

Hier wordt warmteenergie omgezet in snelheid (kinetische energie) van de stoom

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} = h_2 + \frac{v_2^2}{2}$$

Onderstel dat  $v_1 \ll v_2$  dan volgt hieruit dat

$$\Delta h = \frac{v_2^2}{2}$$

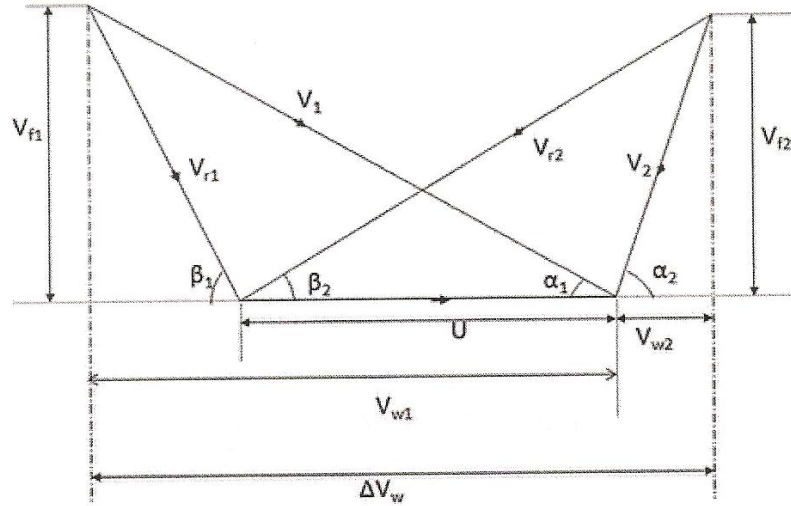
. Het rendement is in dit geval gedefinieerd als de verhouding van de arbeid geleverd op de trap ten overstaande van de toegevoerde enthalpie op de stoom

$$\eta_s = \frac{u\Delta v_w}{\Delta h}$$

### 6.3.2 Reactieturbine

In dit geval moeten we rekenen in termen van enthalpie. De verandering in enthalpie over de rotor

$$\Delta h_m = \frac{v_{r2}^2 - v_{r1}^2}{2}$$



Figuur 6.8: snelheidsdriehoeken reactieturbine

De verandering in enthalpie over de stator

$$\Delta h_f = \frac{v_1^2 - v_0^2}{2}$$

Hierbij wordt gesteld dat  $v_0$  heel klein en zelfs verwaarloosbaar is, dus

$$\Delta h_f = \frac{v_1^2}{2}$$

De toegevoerde energie is  $E = \Delta h_m = \Delta h_f$

In het geval van de Parson's turbine zijn stator en rotor bladen symmetrisch opgebouwd dus  $\alpha_1 = \beta_2$  en  $\beta_1 = \alpha_2$ . Dit heeft dan tot gevolg dat  $v_1 = v_{r2}$  en  $v_{r1} = v_2$ .

$$E = \Delta h_f + \Delta h_m = \frac{v_1^2}{2} + \frac{v_{r2}^2 - v_{r1}^2}{2}$$

$$E = v_1^2 - \frac{v_{r1}^2}{2}$$

De snelheidsdriehoek van de inlaat geeft

$$v_{r1}^2 = v_1^2 + u^2 - 2uv_1 \cos \alpha_1$$

dus

$$E = \frac{v_1^2 - u^2 + 2uv_1 \cos \alpha_1}{2}$$

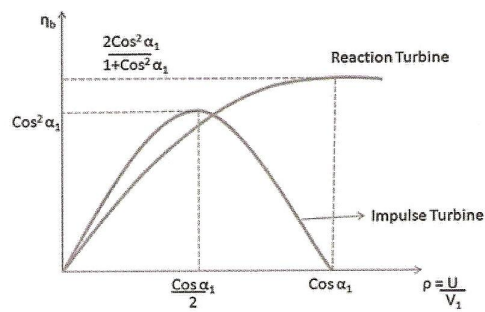
De asarbeid geleverd door de rotor

$$W = u\Delta v_w = u(2v_1 \cos \alpha_1 - u)$$

Het rendement wordt dan

$$\eta_r = \frac{2u(2v_1 \cos \alpha_1 - u)}{v_1^2 - u^2 + 2v_1 u \cos \alpha_1}$$

Onderstaande figuur geeft u een vergelijking van het rotorrendement van beide types turbines.



Figuur 6.9: rotorrendement

### 6.3.3 Types turbines

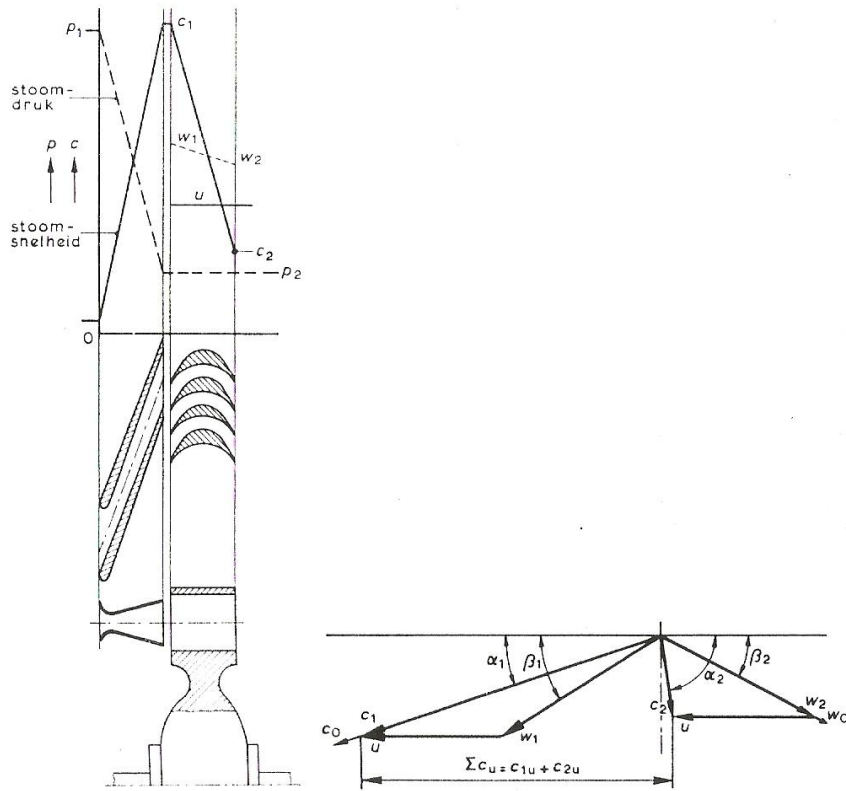
Er bestaan verschillende types axiale turbines die in constructie verschillen. Elk type heeft zijn doel.

1. De Laval turbine: 1 trap dus 1 straalpijp en 1 rotor.  
Dit heeft als grootste nadeel dat de omtrekssnelheden enorm hoog liggen met als gevolg grote trekspanningen in de schoepen.
2. Curtis turbine: is een De Laval maar met meerdere trappen.  
De omtrekssnelheid blijft nu onder controle maar de wervel- en wrijvingsverliezen liggen veel hoger.
3. Rateau turbine: gelijke druk turbine  
De wervel- en wrijvingsverliezen zijn lager dan bij de Curtisturbine Dit type wordt vooral gebruikt bij grote vermogens.
4. Parsons turbine: overdruk turbine  
Het verloop van de doortocht in de loopschoepen is dezelfde als deze in de leischoepen. De warmteval wordt dus gelijk verdeeld over lei- en loopschoepen.

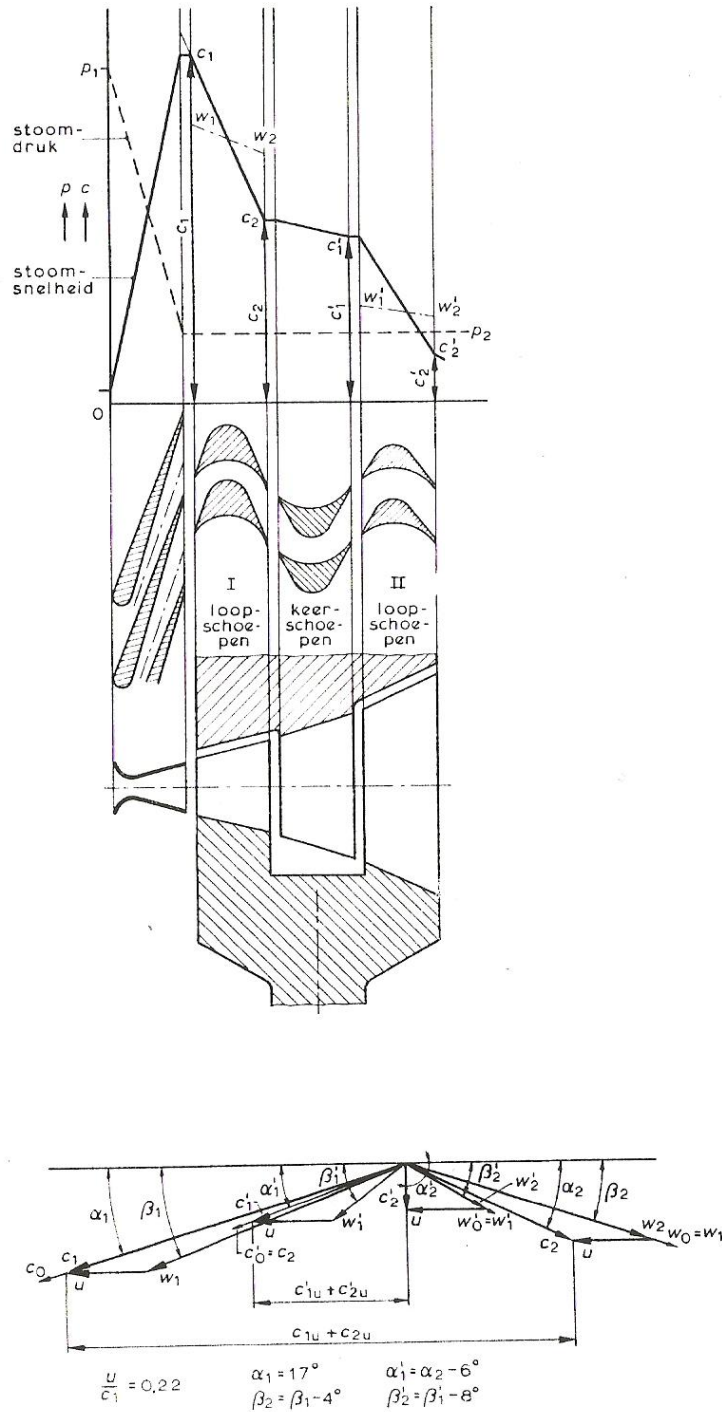
Het onderlinge verband tussen de verschillende turbines wordt weergegeven in onderstaande tabel

type turbine	De Laval	Rateau	Curtis	Parsons
aantal trappen	1	$m_r$	$m_c$	$m_p$
omtrekssnelheid ten opzichte van de Lavalturbine	1	$\frac{1}{\sqrt{m_r}}$	$\frac{1}{m_c}$	$\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2}m_p}}$

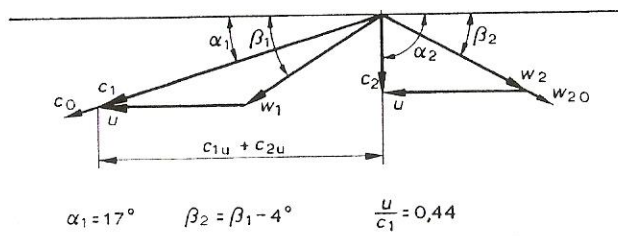
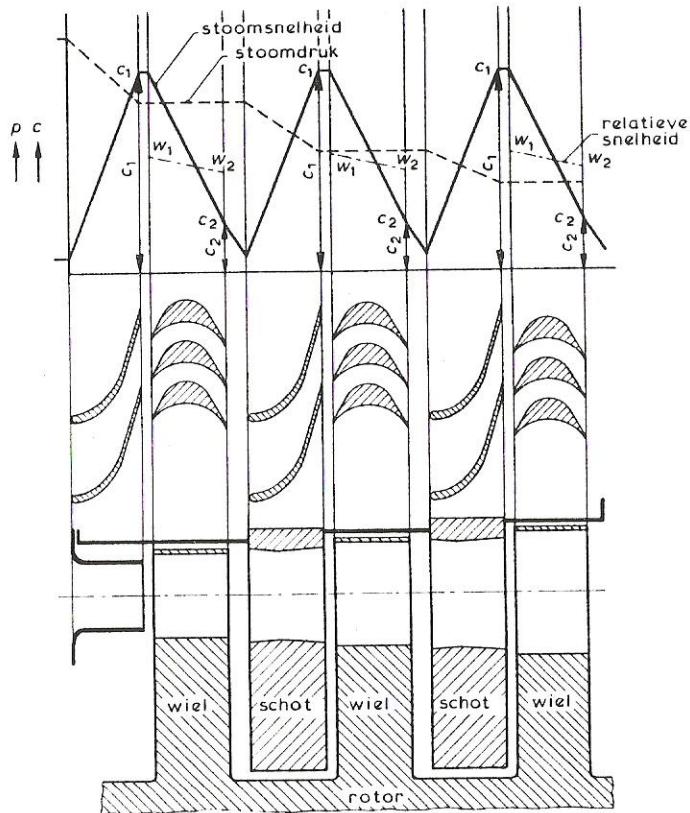
Hieronder de schema's van de constructie en de snelheidsdriehoeken per type turbine



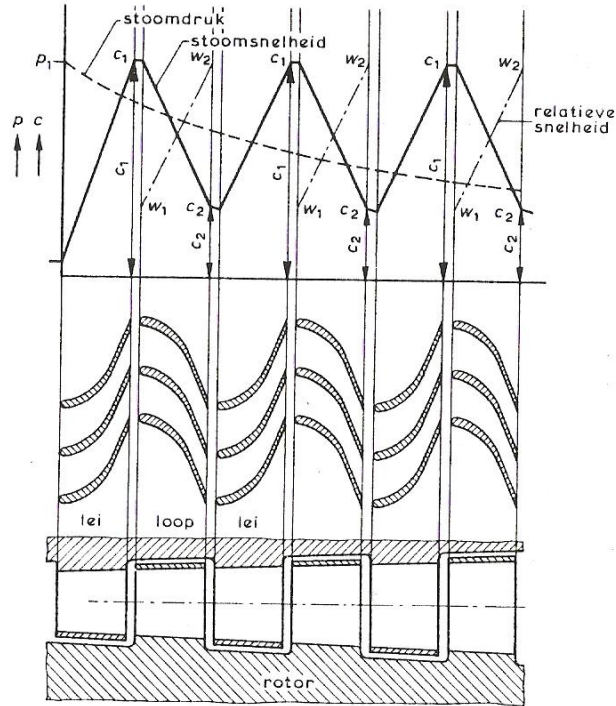
Figuur 6.10: De Laval turbine



Figuur 6.11: Curtis turbine



Figuur 6.12: Rateau turbine



Figuur 6.13: Parsons turbine