



CHALMERS



En modulär vindkraftverksmodell för utbildning och experimentella tillämpningar i Chalmers vindtunnel

Kandidatarbete inom mekanik och maritima vetenskaper

Max Andersson, Ludvig Eriksson, Viggo Fredriksson,
Jonas Hultergård, Ivar Håkansson & William Lindahl

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025

www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2025

En vindkraftverksmodell för Chalmers vindtunnel

Max Andersson, Ludvig Eriksson, Viggo Fredriksson,
Jonas Hultergård, Ivar Håkansson & William Lindahl



CHALMERS

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

MMSX21-VT25-07

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025

En vindkraftverksmodell för Chalmers vindtunnel

Max Andersson, Ludvig Eriksson, Viggo Fredriksson,
Jonas Hultergård, Ivar Håkansson & William Lindahl

© Max Andersson, Ludvig Eriksson, Viggo Fredriksson,
Jonas Hultergård, Ivar Håkansson & William Lindahl, 2025.

Handledare: Valery Chernoray, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Examinator: Isak Jonsson, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Kandidatarbete 2025
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
MMSX21-VT25-07
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag: Renderad 3D-modell av vindkraftverksmodellen. Bakgrund hämtad från Peakpx (2017).

Typsatt i L^AT_EX
Tryckeri /Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Göteborg, Sverige 2025

Sammandrag

Detta projekt presenterar utveckling, konstruktion och utvärdering av ett modellskaligt horisontalaxlat vindkraftverk, särskilt anpassat för experimentella studier i Chalmers vindtunnel. Projektets huvudsyfte var att utveckla en tillförlitlig och modulär prototyp som kan generera experimentella data kring kraftverkets prestanda under varierande vindförhållanden, bladvinklar och elektriska belastningar.

Utvecklingen följde en iterativ produktutvecklingsprocess, där teoretiska beräkningar, aerodynamiska simuleringar, hållfasthetsanalyser och vindtunneltester ingick. En central egenskap hos den färdiga modellen är dess justerbara bladvinkelmekanism, vilken möjliggör synkroniserad vinkelstyrning genom ett internt kugghjulssystem. Komponenterna tillverkades med en kombination av SLA- och extruderande 3D-utskrift samt svarvning och fräsning, vilket säkerställer både mekanisk hållfasthet och dimensionsnoggrannhet.

Kalibrering av den valda motorn, använd som generator, bekräftade dess lämplighet inom det avsedda arbetsområdet. Vindtunnelmätningar visade att modellen kan återge realistiska prestandakurvor, inklusive effektuttag och verkningsgrad (C_p), under olika driftförhållanden. Den högsta uppmätta effekten på 1,8 W vid nominell vindhastighet erhöles vid en bladvinkel på 60° och en elektrisk belastning på $26,3 \Omega$, inom ramen för de testade konfigurationerna.

Prototypen lämpar sig väl för framtida forskning och utbildning. Den utgör en värdefull plattform för studier av rotorers aerodynamik, strukturella laster och reglerstrategier, samt kan fungera som grund för jämförande analyser mellan olika kraftverksarkitekturer.

A Modular Wind Turbine Model for Educational and Experimental Applications in Chalmers Wind Tunnel

Abstract

This project presents the design, construction, and evaluation of a model-scale horizontal-axis wind turbine (HAWT) tailored for experimental studies in Chalmers' wind tunnel. The main objective was to develop a reliable and modular prototype capable of generating experimental data on turbine performance under varying wind conditions, blade angles, and electrical loads.

The project followed an iterative product development process, including theoretical calculations, aerodynamic simulations, structural analysis, and wind tunnel testing. A key feature of the final model is its adjustable blade pitch mechanism, enabling synchronized angle control through an internal gear system. Components were manufactured using a combination of SLA and extrusion 3D printing, as well as a lathed aluminum hub, to ensure both mechanical robustness and dimensional accuracy.

Calibration of the motor, used as a generator, confirmed its suitability within the intended operating range. Wind tunnel measurements verified the model's ability to reproduce realistic performance curves, including power output and efficiency (C_p), across different operating conditions. Maximum measured performance (1.8 W) for the rated wind speed occurred at a blade angle of 60° and an electrical resistance of 26.3Ω , within the range of tested conditions.

The prototype is well suited for future research and educational purposes. It offers a valuable platform for studying rotor aerodynamics, structural loads, and control strategies, and may serve as a foundation for comparing different turbine architectures.

Förord

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare Valery Chernoray och examinator Isak Jonsson för värdefull vägledning och stöd under projektets gång. Arbetet har gett oss värdefulla erfarenheter inom både produktutveckling, strömningsmekanik och samarbete i grupp. Vi vill även tacka Chalmers vindtunnelllaboratorium för möjligheten att genomföra våra tester.

Förkortningar

BPF Bladpassagefrekvens
CAD Computer Aided Design
CFD Computational Fluid Dynamics
HAWT Horizontal-axis wind turbine
NREL National Renewable Energy Laboratory
PETG Polyethylene terephthalate glycol
PLA Polylactic acid
RPM Revolutions per minute
SLA Stereolitografi
SST Shear Stress Transport

Nomenklatur

Dimensionslösa tal

a	Induktionsfaktor
C_D	Luftmotståndskoefficient
C_T	Dragkraftskoefficient
C_p	Kraftverkningsgrad
J	Framdrivningsförhållande
N_{blad}	Antal blad
η_{gen}	Verkningsgrad generator
λ_S	Bladspetsförhållande

Enheter

A_{blad}	Area blad, [m ²]
A_{disk}	Area rotordisk, [m ²]
B	Bredd, [m]
D_{inner}	Innerdiameter, [m]
D_{rotor}	Rotordiameter, [m]
D_{ytter}	Ytterdiameter, [m]
SB	Skivbelastning, [N/m ²]
E	Elasticitetsmodul, [Pa]
F	Aerodynamisk luftmotståndskraft, [N]
F_{total}	Total dragkraft, [N]
f_{BPF}	Bladpassagefrekvens, [Hz]
f_n	Egenfrekvens, [Hz]
H	Djup, [m]

I	Böjtröghetsmoment, [m ⁴]
k	Böjstyvhet, [N/m]
L	Längd torn, [m]
$M_{böj}$	Böjmoment, [Nm]
M_{vrid}	Vridmoment, [Nm]
m	Massa, [kg]
n	Varvtal, [Hz]
P_{effekt}	Effekt, [W]
P_{wind}	Tillgänglig vindenergi, [W]
$P_{turbine}$	Turbinens mekaniska effekt, [W]
R	Specifik gaskonstant för torr luft, [J/(kg·K)]
R_{inner}	Avstånd från rotationscentrum till nav kant, [m]
R_{ytter}	Avstånd från rotationscentrum till bladspets, [m]
RPS	Varv per sekund, [s ⁻¹]
T	Temperatur i Kelvin, [K]
T_{drag}	Dragkraft från vinden, [N]
V	Vindhastighet innan rotorn, [m/s]
W	Böjmotstånd, [m ³]
α_A	Anfallsvinkel, [°]
δ	Böjning, [m]
ρ	Densitet, [kg/m ³]
$\sigma_{böj}$	Böjspänning, [Pa]
σ_{drag}	Dragspänning, [Pa]
ω	Vinkelhastighet, [rad/s]

Innehåll

Förkortningar	ix
Nomenklatur	xi
Figurer	xv
Tabeller	xvii
1 Inledning	1
1.1 Problembeskrivning, syfte och frågeställning	2
1.2 Avgränsningar	3
2 Teori	5
2.1 Aerodynamik och prestanda	5
2.1.1 Effekt- och dragkraftskoefficienter (C_p , C_T) samt diskbelastning .	5
2.1.2 Framdrivning och-bladspetsförhållande	7
2.2 Strömningsmodellering	8
2.3 Hållfasthet och dynamik	9
3 Metod	13
3.1 Utvecklingsprocess	13
3.2 Motorkalibrering	13
3.2.1 Växellåda	15
3.3 Prestandaberäkningar	15
3.4 Hållfasthetsberäkningar	17
3.5 Konstruktionsprocess	17
3.5.1 Iterationer	18
3.6 Tillverkning	23
3.7 Datasamling från vindtunnel	25
4 Resultat	29
4.1 Beräkningar och simuleringssresultat	29
4.1.1 Prestandasresultat	29
4.1.2 Hållfasthetsresultat	30
4.1.3 Flödessimulering	31
4.2 Motorkalibrering	31
4.3 Modell	32

4.4	Vindtunneltester	33
5	Diskussion och Slutsats	39
5.1	Diskussion	39
5.1.1	Beräkningar	39
5.1.2	Motorkalibrering	40
5.1.3	Slutgiltig modell	40
5.1.4	Vindtunneltester	41
5.1.5	Felkällor	42
5.2	Förbättringsförslag	43
5.3	Vidare forskning och kunskapsbehov	44
5.4	Slutsats	44
A	Motorkalibrering	I
B	Vindtunneldata	III
C	Motordatablad	VII
D	Sprängskiss	XI

Figurer

1.1	Exempel på olika typer av vindkraftverk.	2
2.1	Teknisk illustration av bladspetsförhållande (Wagner & Mathur, 2013) . .	8
2.2	Fast inspänd-fri balk med punktlast i toppen.	11
3.1	Kopplingschema för motorkalibrering.	14
3.2	Referensdata av effekt och C_p kurvor (National Renewable Energy Laboratory, 2020).	16
3.3	Iteration 1: 3D-modell av nacell och skiss av navets konstruktion.	18
3.4	Iteration 2: 3D-modell av nacell och skiss av bladinfästning.	19
3.5	Iteration 3: 3D-modell av cylindrisk nacell och genomskärning av nav med intern kugghjulsmechanism för bladvinkeljustering.	20
3.6	Iteration 4: 3D-modell av cylindrisk nacell för motor med växellåda och genomskärning av nav med centralkugghjul integrerat i noskonen.	21
3.7	Iteration 5: 3D-modell av cylindrisk nacell och genomskärning av nav med intern kugghjulsmechanism. Den turkosa delen av navet tillverkas av aluminium. Vinkelmallen används för att ställa bladets angreppsvinkel . .	22
3.8	Iteration 6: Genomskärning av sjätte generationens nav samt 3D-modell av den sammanställda konstruktionen av vindkraftverksmodellen.	22
3.9	Blad utskrivet med SLA-skrivare.	23
3.10	Noskon och kugghjul utskrivna med SLA-skrivare.	24
3.11	Nav i aluminium med ställskruvar.	25
3.12	Skisser över testkonfiguration i vindtunneln.	26
3.13	Modellen under det första vindtunneltestet.	26
4.1	Beräkningsnät från flödessimulering.	31
4.2	Actuator disk-flöde.	31
4.3	Motorns verkningsgrad och vridmoment i testtriggen för 4 olika resistorer, som funktion av RPM. Datan är tagen från motorkalibreringen, för motorns fullständiga datablad se tabell A.1.	32
4.4	Slutgiltiga modellen	33
4.5	Effekt som funktion av RPM för tre olika resistanser, vid 45° bladvinkel i vindtunneltest 1.	34
4.6	Effekten som funktion av vindhastighet för varierande bladvinkel.	35
4.7	Effekten som funktion av vindhastighet för varierande resistans.	35
4.8	Beräknat framdrivningsförhållande för en bladvinkel på 60°, med 26,3 ohm resistans.	36

Figurer

4.9	C_p samt effekt från vindtunneltest två, för 26,3 Ω och varierande bladvinkel.	36
4.10	C_p -kurva med 60° bladvinkel med 26,3 ohm.	37
C.1	Datablad över motorn som användes (specifikt modellnummer 118804).	VIII
C.2	Datablad över tillgängliga växellådor till motorn.	IX
D.1	Sprängskiss över vindkraftverksmodellen.	XII

Tabeller

4.1	Beräknade nyckelparametrar vid 11,4 m/s.	30
4.2	Hållfasthets- och dynamiska parametrar vid extrem belastning.	30
A.1	Motorkalibrering för olika elektriska belastningar.	I
B.1	Vindtunnelresultat för bladvinkel 0°, resistans 10 Ω.	III
B.2	Vindtunnelresultat för bladvinkel 15°, resistans 10 Ω.	III
B.3	Vindtunnelresultat för bladvinkel 30°, resistans 10 Ω.	III
B.4	Vindtunnelresultat för bladvinkel 45°, resistans 10 Ω.	III
B.5	Vindtunnelresultat för bladvinkel 60°, resistans 5 Ω.	IV
B.6	Vindtunnelresultat för bladvinkel 60°, resistans 10 Ω.	IV
B.7	Vindtunnelresultat för bladvinkel 52.5°, resistans 10 Ω.	IV
B.8	Vindtunnelresultat för bladvinkel 60°, resistans 15 Ω.	IV
B.9	Vindtunnelresultat för bladvinkel 60°, resistans 15 Ω, med tornet vridet 45°.	IV
B.10	Vindtunnelresultat för bladvinkel 60°, resistans 26 Ω.	V
B.11	Vindtunnelresultat för bladvinkel 75°, resistans 10 Ω.	V
B.12	Vindtunnelresultat för mätserier där målet var att uppnå och därefter behålla 500 RPM.	V
B.13	Tabell över kraft- och momentdata från sexpunktsvågen, sammanställt i ett Google Kalkylark.	VI

1

Inledning

Enligt en rapport från Energimyndigheten bedöms Sveriges elbehov öka från 132 TWh år 2023 till mellan 168-174 TWh redan 2028, för att sedan ligga mellan 200-340 TWh år 2045 (Energimyndigheten, 2024). I samma rapport framgår det att utbyggnad av bland annat landbaserad vindkraft är en viktig del i arbetet att möta energibehoven fram till början av 2030-talet, och att även havsbaserad vindkraft på sikt kan bidra till ny elproduktion. Statistik från Statistiska Centralbyrån (2023), SCB, visar att svensk vindkraft genererade 34 TWh år 2023, motsvarande ca 20% av Sveriges totala elproduktion samma år, men detta kommer i framtiden behöva öka för att möta elbehovet.

I takt med att vindkraften byggs ut i Sverige ökar även behovet av omfattande skadeanalyser. En växande vindkraftsflotta innebär fler potentiella felkällor, samtidigt som äldre generationer åldras och därmed löper en ökad risk för haverier. Detta kan innebära risker för personskador, betydande ekonomiska förluster och bortfall i elproduktion (Ny Teknik, 2025). För att möta dessa utmaningar krävs systematiska tester och optimering av vindkraftverken, med särskilt fokus på rotorbladen, en nyckelkomponent för både säkerhet och aerodynamisk prestanda. Även valet av kraftverksarkitektur spelar en avgörande roll för effektiviteten i energiomvandlingen.

Utformningen av vindkraftverkens blad, inklusive deras angreppsvinkel, har en avgörande inverkan på effektivitet, hållbarhet och ljudnivå (Alternative Energy Tutorials, 2025). Bladen bör utformas för att maximera energiproduktionen samtidigt som materialanvändningen hålls på en minimal nivå. Samtidigt måste de vara effektiva över ett brett spektrum av vindhastigheter utan att riskera skador vid kraftiga vindförhållanden. Av denna anledning har bladen utvecklats från enkla metallplattor till avancerade aerodynamiska profiler som är optimerade för sitt syfte. Moderna vindkraftsblad har en aerofoil-profil, likt en flygplansvinge, vilket skapar lyftkraft och förbättrar energieffektiviteten. För att hantera de varierande rotationshastigheterna längs bladet är de dessutom vridna, vilket säkerställer en optimal angreppsvinkel från rotorn till spetsen. Denna utformning möjliggör en mer effektiv omvandling av vindens energi till mekanisk rotation, vilket i sin tur ökar elproduktionen.

Vindkraftverk kan generellt delas upp i två sorter, horisontella och vertikala. En majoritet av industriella vindkraftverk är idag horisontella eftersom de har högre verkningsgrad och producerar mer el än vertikala vindkraftverk (Eftekhari, 2022). Detta beror på att

deras blad alltid rör sig med vinden, till skillnad från vertikala vindkraftverk där en del av bladen hela tiden rör sig mot vindriktningen, vilket orsakar energiförluster. Samtidigt är horisontella vindkraftverk tyngre, dyrare och kräver en specifik vindriktning för optimal drift, medan vertikala kan ta emot vind från alla håll, är enklare att installera och ger lägre bullernivåer. De har däremot en lägre total verkningsgrad och kan behöva tillförd energi för att starta. Ett exempel på ett horisontellt vindkraftverk visas i figur 1.1a och ett vertikalt i figur 1.1b.



(a) Horisontalaxlat vindkraftverk (Britannica ImageQuest, Encyclopædia Britannica, ca 2017). (b) Vertikalaxlat vindkraftverk (Britannica ImageQuest, Encyclopædia Britannica, 2016).

Figur 1.1: Exempel på olika typer av vindkraftverk.

Sammantaget behöver ingenjörer som kommer att vara verksamma inom vindkraft vara väl förberedda för att kunna lösa tekniska utmaningar inom området. Det medför ett behov av utbildningsmaterial för ingenjörstudenter för att lära sig om vindkraft. En fysisk modell av ett horisontellt vindkraftverk skulle kunna bidra till en ökad förståelse för tekniken bakom vindkraft och vara ett hjälpmedel för inlärning samt kunna användas i framtida forskning.

1.1 Problembeskrivning, syfte och frågeställning

För att i framtiden kunna genomföra grundläggande studier och undervisning inom vindkraftverk ska en vindkraftverksmodell lämplig för användning i Chalmers vindtunnel tas

fram. Modellen ska kunna användas för att med hjälp av sensorer för varvtal och effekt ta fram prestandakurvor. I framtiden ska modellen även kunna användas för att ta fram experimentella data kring hur varierande scenarion och konfigurationer, såsom olika bladdesigner, påverkar effektproduktion, krafter och vibrationer. För att säkerställa tillförlitlig experimentell data av vindkraftverksmodellen behövs identifiering av optimal motor, angreppsvinkel samt design av vinkeln och infästningen av bladen. Under processen kommer förmågor att utvecklas inom områden som är relevanta för större framtida projekt, inom forskning eller industriella syften. Exempel på detta är datorstödd konstruktion, additiv tillverkning, strömningsmekanik och industriella simuleringsverktyg. Det är även möjligt att den färdiga produkten kan användas för att jämföras med en motsvarande modell för vertikala vindkraftverk, i syfte att mäta och visualisera deras respektive styrkor och svagheter.

Syftet med denna rapport är att beskriva utvecklingsprocessen och resultaten av en horisontell vindkraftverksmodell framtagen för Chalmers vindtunnel. Rapporten redogör för den teoretiska bakgrunden, tillämpade metoder, slutliga resultat samt en diskussion av dessa.

Detta resulterar i följande frågeställning: Hur kan designen av en horisontalaxlad vindkraftverksmodell optimeras för att generera experimentella data i Chalmers vindtunnel, vilka överensstämmer med etablerade effekt–vindhastighetskurvor? Syftet är att mäta den genererade effekten vid varierande vindhastigheter och analysera överensstämmelsen mellan experimentella resultat, teoretiska beräkningar och numeriska simuleringar.

1.2 Avgränsningar

En avgränsning i arbetet var storleken på modellen, vilken bestäms av vindtunnelns storlek. Vindtunneln som användes har en höjd på 1,2 meter och en bredd på 1,8 meter, och modellen bör vara liten nog att ej påverkas avsevärt av väggarna. Detta innebar i sin tur begränsningar på hur stort motorhuset, och därmed generatoren, kunde vara. Ekonomi var också en begränsande faktor då projektet har en budget på 5000 kr för bland annat tillverkningen av modellen. Tidsaspekten var också en av de viktigaste avgränsningarna eftersom arbetet skall vara klart i slutet av vårterminen 2025.

2

Teori

I detta kapitel presenteras det teoretiska ramverket för de beräkningar och simuleringar som genomförts i projektet. Teorin är grupperad utifrån ämnesområden: aerodynamik, strömningsmodellering samt hållfasthet och dynamik.

2.1 Aerodynamik och prestanda

Denna del behandlar grundläggande aerodynamiska principer som påverkar vindkraftverkets prestanda. Fokus ligger på hur energi utvinns ur vinden, samt hur olika dimensionslösa tal och koefficienter används för att analysera och optimera modellens effektivitet.

Den teoretiskt maximala energin som går att utvinna ur vinden med ett vindkraftverk är 59,3 %. Det betyder att det är 59,3 % av den kinetiska energin i vinden som kan omvandlas till mekanisk energi som får vindturbinen att snurra. Detta kallas för Betz lag efter den tyska fysikern Albert Betz (Tavares & Patrício, 2020).

2.1.1 Effekt- och dragkraftskoefficienter (C_p , C_T) samt diskbelastning

Dragkraftskoefficienten (C_T) och effektkoefficienten (C_p) är två dimensionslösa tal som används för att analysera ett vindkraftverks aerodynamiska prestanda.

C_T beskriver förhållandet mellan den aerodynamiska kraften som verkar på rotorn och vindens totala kinetiska energi. Ett högt C_T innebär att en större andel av vindens kraft belastar kraftverket (Agbormbai & Zhu, 2020).

Effektkoefficienten C_p anger hur stor andel av vindens tillgängliga energi som omvandlas till mekanisk effekt i rotorn. Enligt Betz lag så är maximalt $C_p = 0,593$ men i praktiken ligger C_p vanligtvis mellan 0,35-0,45 beroende på kraftverkets konstruktion och driftförhållanden (Thunder Said Energy, 2023).

För att beräkna C_p behövs både den mekaniska effekten i kraftverket och den tillgängliga vindenergin. Den senare beräknas enligt:

$$C_{\text{wind}} = \frac{1}{2} \rho A_{\text{disk}} V^3$$

Navet i ett vindkraftverk bidrar i regel inte till energiomvandlingen. Beräkning av rotora-rean justeras därför enligt:

$$A_{\text{disk}} = \pi(R_{\text{ytter}}^2 - R_{\text{inner}}^2)$$

Effekten som utvinns ur vinden beräknas enligt:

$$P_{\text{turbine}} = C_p \cdot P_{\text{wind}}$$

Den mekaniska effekten kan också uttryckas med hjälp av vridmoment och rotationshastighet:

$$P_{\text{turbine}} = M \cdot \omega \quad \omega = \frac{2\pi V}{J \cdot D} \quad C_p = \frac{M_{\text{vrid}} \cdot V \cdot 2\pi}{J \cdot D_{\text{rotor}} \cdot P_{\text{wind}}}$$

Den elektriska effekten ut från generatoren påverkas dessutom av generatorns verkningsgrad η_{gen} :

$$P_{\text{el}} = \eta_{\text{gen}} \cdot P_{\text{turbine}}$$

I detta projekt antogs en generatorverkningsgrad på $\eta_{\text{gen}} = 0,85$. För fullständigt datablad se bilaga C.1.

För att uppskatta den axiella dragkraften som vinden utövar på vindkraftverksmodellen användes den idealiserade actuator disk-teorin. Enligt denna modell beräknas dragkraft som:

$$T_{\text{drag}} = \frac{1}{2} \rho A_{\text{disk}} C_T V^2$$

Denna relation bygger på dragkraftskoefficienten C_T och används ofta i vindtunneltester för att koppla den observerade belastningen till idealiserade aerodynamiska förhållanden, och ger en teoretisk grund för att jämföra experimentella resultat med etablerad litteratur.

För uppskattning av C_T används en induktionsfaktor a enligt Buhl, M. L., Jr. (2005).

$$C_T = 4a(1 - a)$$

Värdet på a approximeras till $\frac{1}{3}$. Vilket ger:

$$C_T = 4 \cdot \frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{3}\right) \approx 0,89$$

Ett närliggande och användbart begrepp i aerodynamisk analys är skivbelastning (SB), som beskriver hur mycket kraft rotern överför per enhet av sin svepta yta. Det definieras som:

$$SB = \frac{T_{\text{drag}}}{A_{\text{disk}}}$$

En hög skivbelastning indikerar att mycket energi utvinns per ytenhet, vilket kan leda till högre strukturell belastning och ökad turbulens i luftströmmen bakom rotern. Ett lågt SB innebär däremot en jämnare kraftfördelning och ofta bättre aerodynamisk stabilitet — något som kan vara särskilt viktigt vid vindtunneltester och vid utvärdering av småskaliga modeller (Möhren m. fl., 2023).

2.1.2 Framdrivning och-bladspetsförhållande

Framdrivningsförhållande (J) är ett dimensionslöst tal som beskriver förhållandet mellan en rotors relativa framåtrörelse i ett luftflöde och dess rotationshastighet. Det används för att analysera prestandan hos propellrar och vindkraftsrotorer i ett luftflöde (Liu m. fl., 2023), och beräknas som vindhastigheten dividerat med produkten av rotorns rotationshastighet och diameter,

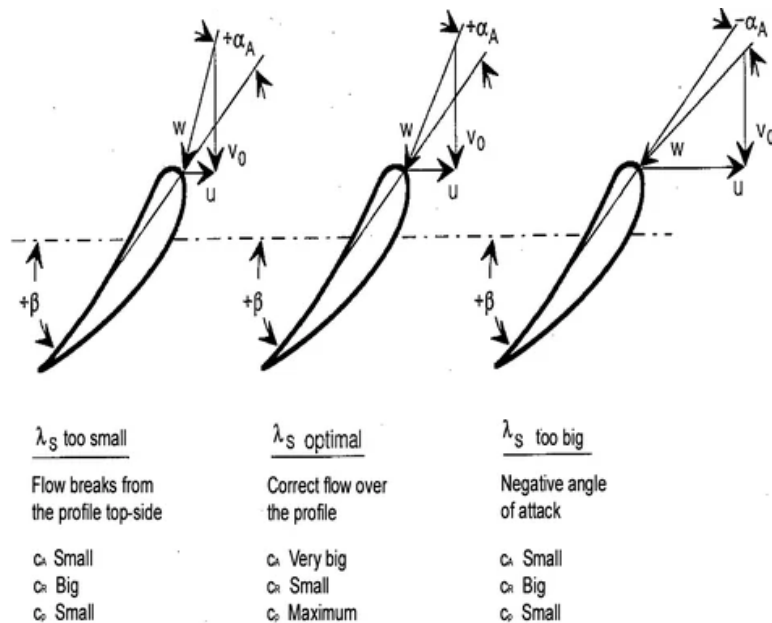
$$J = \frac{V}{n \cdot D_{\text{rotor}}}$$

I många fall används bladspetsförhållande (λ_S) istället för framdrivningsförhållande. λ_S ges av inversen av framdrivningsförhållandet, multiplicerat med en faktor 2π ,

$$\lambda_S = \frac{2\pi}{J}.$$

När λ_S (tip speed ratio) sjunker, ökar anfallsvinkeln α_A , vilket kan leda till att flödet separerar från vingprofilen om en kritisk vinkel överskrids. Detta orsakar så kallad *stall*, vilket resulterar i en kraftig minskning av lyftkraften och därmed turbinens verkningsgrad.

Om λ_S istället är för stor, rör sig rotorbladen för snabbt i förhållande till vinden, vilket minskar energin som kan extraheras per varv och därmed också verkningsgraden. Figur 2.1 illustrerar hur olika värden på bladspetsförhållande påverkar luftflödet över rotorbladet (Wagner & Mathur, 2013).



Figur 2.1: Teknisk illustration av bladspetsförhållande (Wagner & Mathur, 2013)

I figur 2.1 visas hur olika värden på bladspetsförhållande λ_S , alltså förhållandet mellan spetsens rotationshastighet och inflödeshastigheten, påverkar luftflödet över ett rotorblad i ett vindkraftverk. Tre olika fall visas:

- λ_S för liten (vänster)
- λ_S optimal (mitten)
- λ_S för stor (höger)

I detta fall är effektkoefficienten C_p det mest centrala värdet. Som framgår av figuren uppnås det högsta C_p -värdet i det mellersta fallet i figur 2.1, vilket innebär att denna bladvinkel ger den bästa verkningsgraden. Därför är det just vinkel för optimalt C_p som bör eftersträvas när målet är att maximera effektiviteten.

2.2 Strömningsmodellering

För att analysera hur luftflödet påverkar turbinen i en kontrollerad vindtunnelmiljö används numeriska strömningssimuleringar. I detta avsnitt presenteras de turbulensmodeller och förenklade representationer som tillämpats för att modellera flödet kring rotor och torn. De beräkningsmodeller som används i studien är aktuatoriskmodellen för att representera rotorn, samt turbulensmodellen SST $k-\omega$ för att lösa de tidsmedlade Navier–Stokes-ekvationerna.

Aktuatoriskmodellen är en förenkling inom aerodynamiska beräkningar, där rotorn modelleras som en genomtränglig yta med jämnt fördelad last. Detta används för att förenkla

simuleringar i t.ex. CFD-program. En begränsning med modellen är att den inte återger detaljerad virvelstruktur i flödet bakom rotern, vilket kan påverka noggrannheten vid t.ex. beräkning av turbulens.

Vid modellering användes SST k - ω -modellen som bygger på två transportekvationer:

- k : turbulent kinetisk energi – representerar energin i turbulensfluktuationer.
- ω : specifik dissipation – beskriver hur snabbt turbulensenergin försvinner.

Modellen används ofta vid strömningsberäkningar kring vindturbiner eftersom den hanterar övergången mellan laminärt och turbulent flöde väl, och möjliggör noggranna beräkningar nära väggar.

För att minska påverkan av väggarna i en vindtunnel används ofta en riktlinje där den testade kroppens tvärsnittsarea inte överstiger 10% av tunnelns tvärsnittsarea, det så kallade blockeringsförhållandet. Enligt Massey & Ward-Smith (2005) är detta en praktisk gräns som säkerställer att störningar i flödet—som uppstår när luft tvingas runt testobjektet i en begränsad strömningskanal—hålls på en nivå där de inte signifikant påverkar mätresultaten. Överskrider denna gräns kan resultaten snedvridas, vilket gör jämförelser med fria strömningsförhållanden mindre tillförlitliga.

Vid simulering av vindtunnelförhållanden används ofta förenklade modeller såsom aktuatorisk i kombination med modeller för tunnelväggarna. I detta projekt användes dessa för att kvantifiera hur stor påverkan väggarna hade på effektupptaget (C_p).

2.3 Hållfasthet och dynamik

Här presenteras de teoretiska grunderna för att analysera de mekaniska belastningar som turbinen utsätts för. Avsnittet täcker materialspänningar, strukturell böjning samt risker för resonans, och används som underlag för hållfasthetsberäkningar i projektet.

Luftmotståndet (F) är en kraft som uppstår på ett föremål när det rör sig genom en fluid, såsom luft. Där formeln enligt Lumen Learning (2025) beskrivs såhär:

$$F = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A_{\text{disk}}$$

Där luftens densitet är ρ , vindhastigheten är V , arean A_{disk} är vinkelrät mot vindens riktning, och C_D är luftmotståndskoefficienten. Luftmotståndskoefficienten är en dimensionslös faktor som beskriver hur stort motstånd ett föremål utövar mot luftflödet, lägre värden indikerar lägre motstånd. För cylindriska strukturer, såsom vindkraftverkets torn, används ett standardvärde på cirka 1,2, enligt Orcina (2023). För vindkraftverkets blad antas luftmotståndskoefficienten $C_{D,\text{blad}}$ till cirka 1,0 i ett värsta scenario, eftersom detaljerad aerodynamisk data för de nedskalade bladen saknas. Detta värde motsvarar typiska värden för plana, tunna kroppar i normalvinkel mot flödet, enligt data från Engineering

Toolbox (2023).

De två spänningarna som behandlas är böjspänning samt dragspänning. Böjspänning uppstår när en komponent böjs av en yttre kraft, över rotorbladets yta när det påverkas av vindlast. För att förenkla beräkningarna antas rotorbladets tvärsnittsgeometri vara ett rätblock för att få fram böjmotståndet (W), vilket möjliggör beräkning av böjspänningen där ($M_{böj}$) är momentet enligt:

$$\sigma_{böj} = \frac{M_{böj}}{W} \quad W = \frac{BH^2}{6}$$

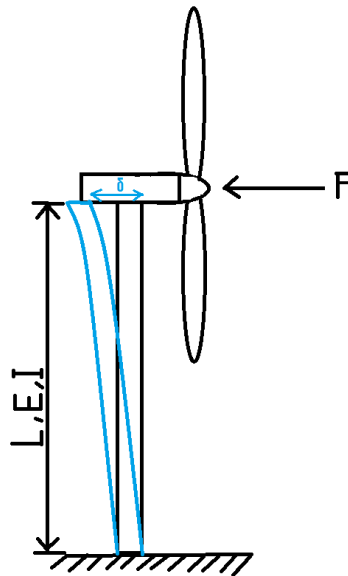
Dragspänning uppstår från centrifugalkraften under rotationen. Den kvantifierar hur mycket strukturen dras isär och är relevant för materialval samt hållbarhet. Dragspänning beräknas med följande formel:

$$\sigma_{drag} = \frac{m \cdot R_{ytter} \cdot \omega^2}{A_{blad}}$$

Vindens kraft belastar mest tornets blad och nav vilket kommer leda till att vindkraftverkets torn kommer böjas. Alla horisontella krafter kan centreras till en punktlast i mitten på navet. Detta medför att böjningen av tornet kan beräknas som en fast inspänd-fri balk med punktlast i toppen enligt formlerna från boken *Handbok och formelsamling i hållfasthetslära* (Red. Sundström, 2023):

$$\delta = \frac{L^3 F}{3EI} \quad I = \frac{\pi(D_{ytter}^4 - D_{inner}^4)}{64}$$

I figur 2.2 visualiseras böjningen δ utifrån kraften som påverkar vindkraftverket horisontellt och de viktiga materialegenskaper där F är den horisontella punktlasten och EI är materialets elasticitetsmodul och böjstyvhet.



Figur 2.2: Fast inspänd-fri balk med punktlast i toppen.

Resonans är ett fenomen som kan uppstå om en yttre kraft har samma frekvens som systemets egenfrekvens, där egenfrekvensen är den naturliga frekvens som ett system har när det svänger fritt. Bladpassagefrekvensen är den frekvens med vilken rotorbladen passerar en given punkt, exempelvis tornet, och därmed periodvis exciterar strukturen. Egenfrekvensen f_n beskrivs med formler från Lunds tekniska högskola i dokumentet *Single degree of freedom* (Vardaxis, 2021) där k är böjstyvheten i systemet. Följande formler för egenfrekvensen f_n , böjstyvheten k samt bladpassagefrekvensen f_{BPF} ser ut enligt:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad k = \frac{3EI}{L^3} \quad f_{\text{BPF}} = N_{\text{blad}} \cdot RPS$$

3

Metod

Projektet kan betraktas som ett produktutvecklingsarbete och delas därför in i tre huvudsakliga faser: konstruktion, tillverkning och utvärdering. Dessa faser har utförts iterativt, där en första, enklare prototyp togs fram tidigt i processen. Erfarenheter och insikter från denna initiala version låg till grund för förbättringar och vidareutveckling i kommande iterationer.

3.1 Utvecklingsprocess

Det första steget i produktutvecklingen var att bestämma modellens rotordiameter, eftersom denna parameter påverkar samtliga komponenter. För att optimera diametern genomfördes en initial CFD-simulation som tog hänsyn till vindtunnelns dimensioner och säkerställde att tunnelväggarnas påverkan begränsades. Parallellt med detta skapades en första 3D-modell, där tidiga tankar om tillverkningsmetoder uppstod, bland annat att navet och bladen skulle tillverkas additivt. Här identifierades två centrala utmaningar: att säkerställa en tillräcklig hållfasthet i infästningen mellan nav och blad, samt att möjliggöra justering av bladens vinkel.

För att utvärdera dessa aspekter tillverkades en första delprototyp, vars syfte var att ge insikter om additivt tillverkade komponenters mekaniska egenskaper. Denna modell innehöll inga rörliga delar och bestod endast av en del av ett rotorblad.

Utifrån dessa insikter togs en ny modell fram med ett kugghjulssystem i navet, vilket möjliggjorde synkron vinkeljustering av bladen. Samtidigt utfördes teoretiska beräkningar av nyckelparametrar såsom effekt, vridmoment och varvtal, vilket låg till grund för val av motor. Innan tillverkning genomfördes även en separat motorkalibrering för att säkerställa dess lämplighet. När valet av motor var klart kunde mer detaljerade CAD-modeller tas fram, utvärderas och förbättras, något som beskrivs i mer detalj i sektion 3.5.

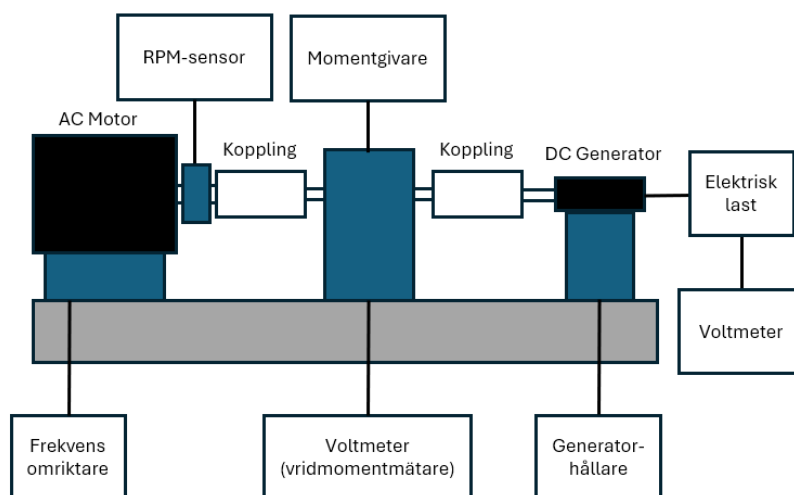
3.2 Motorkalibrering

Valet av motor var en central och begränsande faktor för projektet, varför en grundlig utvärdering påbörjades tidigt i processen. Motorns roll är att agera generator, vilket innebär att den ansvarar för att bromsa rotns rotation och på så sätt omvandla mekanisk energi

3. Metod

till elektrisk energi. En underdimensionerad motor riskerar att leda till överhettning, otillräcklig effektproduktion eller okontrollerad, skenande rotation. Tidiga beräkningar visade att motorns maximala vridmoment potentiellt kunde överskridas under drift. Dessutom var det från motorns datablad oklart vilka driftförhållanden, i form av elektrisk resistans och rotationshastighet (RPM), som gav optimal elektrisk effekt och verkningsgrad.

För att säkerställa motorns lämplighet och identifiera dess optimala driftpunkt genomfördes en noggrann kalibrering i en specialbyggd testrigg. Testriggen bestod av en kraftigare AC-motor som drev testobjektet, en vridmomentgivare för noggranna mätningar av vridmoment, en RPM-sensor för att registrera rotationshastigheten, en uppsättning resistorer för att simulera elektrisk belastning samt en voltmeter för beräkning av verkningsgrad. För kopplingschema, se figur 3.1. Under kalibreringen undersöktes fyra olika elektriska belastningar (resistorer med värden $26,5 \Omega$, 12Ω , $4,5 \Omega$ och $2,4 \Omega$), vid sex rotationshastigheter som sträckte sig från 120 RPM upp till 3000 RPM.



Figur 3.1: Kopplingschema för motorkalibrering.

Resultaten från kalibreringen sammanställdes och analyserades, se tabell A.1 i appendix. Utifrån denna analys kunde slutsatsen dras att motorn skulle fungera väl och ge tillfredsställande resultat i det kommande vindtunneltestet. Kalibreringen gav också viktig insikt i hur valet av resistans och varvtal påverkade motorns vridmoment och elektriska effekt, vilket möjliggjorde ett motiverat val av driftparametrar inför det praktiska vindtunneltestet.

3.2.1 Växellåda

Preliminära beräkningar visade att en växellåda kunde vara nödvändig för att hantera det förväntade vridmomentet. En växellåda med en utväxlingsfaktor på cirka 23 undersöktes, vilket skulle reducera vridmomentet till ett hanterbart värde, men samtidigt begränsa turbinens rotationshastighet kraftigt. Den maximala rotationshastigheten för turbinen, utan att överskrida motorns begränsning, skulle i så fall bli cirka 355 RPM, vilket bedömdes vara för lågt för optimal drift.

Dessutom skulle en växellåda leda till ytterligare effektförluster, med en verkningsgrad på maximalt cirka 75 % enligt datablad, se tabell C.2 i appendix. Efter noggranna överväganden och analys av kalibreringsresultaten beslutades därför att inte använda någon växellåda. Detta beslut fattades med hänsyn till både effektivitet och önskat varvtal, samt resultaten från kalibrering som indikerade att motorn i praktiken kunde hantera högre vridmoment än vad de preliminära beräkningarna först antydde.

3.3 Prestandaberäkningar

Beräkningarna i denna del har använts för att kunna dimensionera modellen, samt välja lämplig motor och kringkomponenter. Teorin bakom respektive nyckeltal baseras på etablerad litteratur, främst *Wind Energy Handbook* (Burton m. fl., 2001), och har anpassats till vindtunnelns specifikationer. Eftersom många av parametrarna är beroende av varandra, har beräkningarna utförts i en särskild ordning.

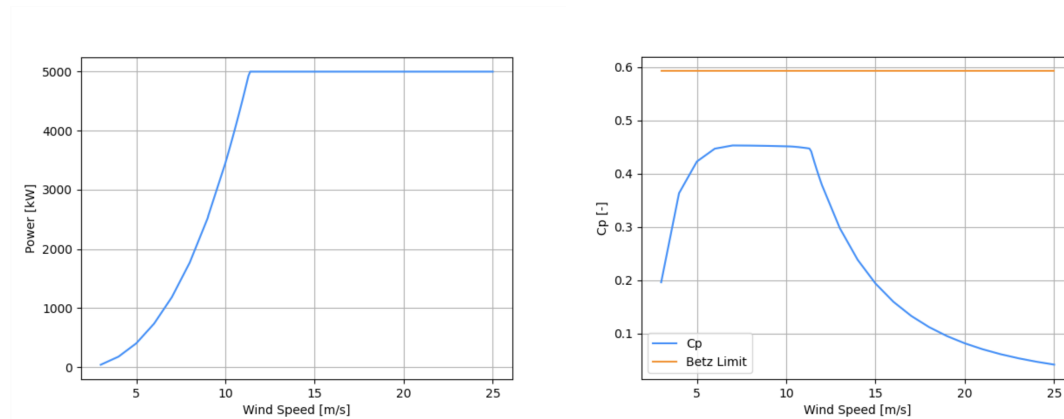
Samtliga prestationsberäkningar i detta avsnitt utgår från nominella driftförhållanden vid en vindhastighet på 11,4 m/s, vilket motsvarar en rimlig nominell vindhastighet enligt NREL:s 5MW-kraftverksmodell (Jonkman, 2009).

Först beräknades framdrivningsförhållandet (J), ett dimensionslöst nyckeltal som relaterar inflödes hastighet till rotordiameter och rotationshastighet. Det användes som prestandamått och som ett sätt att koppla modellen till fullskaliga vindkraftverk.

Därefter uppskattades den tillgängliga effekten i vinden utifrån svept area och luftdensitet. Den mekaniska effekten härleddes via effektkoefficienten C_p och därefter korrigerades resultatet med generatorns verkningsgrad för att ge den elektriska effekten. Dessa resultat låg till grund för dimensionering av motor och elektriska komponenter. Ursprungliga beräkningar antydde behovet av en växellåda, men efter kalibrering visade sig direkt drift vara tillräcklig.

För att kunna verifiera testresultat togs referensdata fram från ett fullskaligt vindkraftverk. Datan hämtades från National Renewable Energy Laboratory (2020).

3. Metod



(a) Effekt mot vindhastighet.

(b) C_p mot vindhastighet.

Figur 3.2: Referensdata av effekt och C_p kurvor (National Renewable Energy Laboratory, 2020).

I figur 3.2 presenteras referensdata som visar hur effektuttaget samt effektkoefficienten (C_p) varierar med vindhastigheten. Syftet med testresultaten är att efterlikna dessa karakteristiska trender genom att justera bladens ställvinkel beroende på rådande vindförhållanden. Genom denna metod avses optimering av turbinen för att uppnå en liknande prestandakurva som det fullskaliga referenssystemet.

Vridmomentet (M_{vrid}) härleddes från effekt och rotationshastighet enligt $M_{vrid} = \frac{P_{turbin}}{\omega}$ vilket spelade en viktig roll vid val av transmissionslösning eftersom momentet är en begränsande faktor för motorn.

För att analysera hur vindtunnelns begränsade tvärsnitt påverkar strömningsfältet kring turbinen, samt för att fastställa en lämplig turbindiameter, genomfördes en bedömning av så kallade blockeringseffekter. Enligt etablerad praxis bör testobjektets tvärsnittsarea inte överstiga 10% av vindtunnelns tvärsnittsarea för att minimera vägginducerade störningar i luftflödet. Överskridande av denna gräns kan leda till artificiellt ökad lufthastighet kring testobjektet och därmed påverka mätvärden som kraft, moment och verkningsgrad.

För att kvantifiera blockeringseffekternas inverkan genomfördes förenklade numeriska simuleringar i ANSYS Fluent med hjälp av en Actuator Disk-modell, vilken representerar turbinen som en genomtränglig skiva med fördelad belastning. Simuleringarna utfördes i två varianter: dels med vindtunnelns väggar inkluderade, dels i ett idealiserat oändligt flödesfält utan väggar. Den jämförande analysen fokuserade på skillnader i vindhastigheten genom disken.

Slutligen beräknades så kallad skivbelastning utifrån det beräknade C_T -värdet, vilket relaterar axialkraften till rotorarean och är användbart för att bedöma rotorns inverkan på luftflödet. Detta värde användes för att analysera förväntad bromsning av luftströmmen och för att komplettera simuleringarna.

3.4 Hållfasthetsberäkningar

Modellens förmåga att motstå de krafter den utsätts för vid högre vindhastigheter säkerställdes genom flera hållfasthetsrelaterade beräkningar. Dessa inkluderade böjning av tornet, spänningar i rotorbladen samt risk för resonanssvängningar. Beräkningarna utgick från ett värsta scenario med en antagen vindhastighet på 20 m/s och nominella vindhastigheten 11,4 m/s.

Som grund för dessa analyser beräknades horisontella krafter från luftmotstånd hos både torn och rotorblad. Även om dessa krafter är relativt små vid normal drift, är de viktiga för att uppskatta total belastning och krav på strukturens styvhet och förankring.

För tornets utformning modellerades det bärande röret som en fast inspänd-fri balk med en punktlast i toppen. Lasten inkluderade både vindlast och turbinens vikt. Böjningen beräknades med hjälp av klassisk balkteori (Red. Sundström, 2023, s.358), där parametrar som böjtröghetsmoment, längd och elasticitetsmodul ingår. Det bärande röret är ett stålrör med 12 mm diameter och 2 mm väggjocklek, längden 610 mm och elasticitetsmodul på 210 GPa.

Rotorbladens hållfasthet analyserades med avseende på både böjspänning från aerodynamisk last och dragspänning från centrifugalkraften. Resultaten jämfördes med materialegenskaper hos hårdplast för 3D-skrivare av SLA-typ, och visade att säkerhetsmarginalen var mycket god enligt material datablad från (Anycubic, 2025).

För att minimera risken för resonans beräknades turbinens egenfrekvens genom att modellera tornet som ett massa-fjädersystem. Eftersom vindkraftverket har tre blad, innebär detta att bladpassagefrekvensen är tre gånger rotationsfrekvensen. För att undvika resonans bör därför rotationsfrekvensen inte vara en tredjedel av tornets egenfrekvens, då detta skulle leda till att bladpassagefrekvensen sammanfaller med egenfrekvensen och därmed riskera att resonans uppstår i systemet, se sektion 2.3.

3.5 Konstruktionsprocess

Utvecklingen av kraftverksmodellen har varit en iterativ process där konstruktionen i flera steg har utvecklats efter tester och utvärdering. Eftersom projektet till stor del syftar till att skapa en fungerande modell har stor vikt lagts vid varje konstruktionsbeslut. Konstruktionsprocessen har därför utgjort en stor del av arbetstiden, eftersom varje version har analyserats med avseende på funktion, hållfasthet, tillverkningsmöjligheter och aerodynamisk prestanda. Nedan visas några av de CAD-modeller som utvecklats under projektets gång, tillsammans med motiveringar till varför vissa lösningar valdes bort och hur förbättringar implementerades i nästkommande iterationer. Denna process har varit avgörande för att producera en modell som både är tekniskt genomförbar och uppfyller projektets mål.

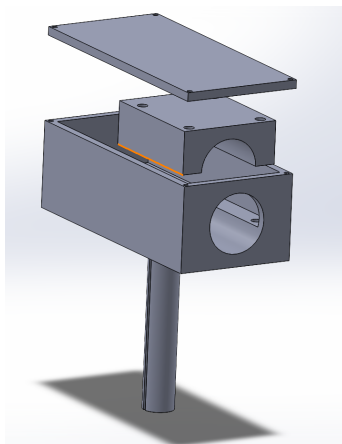
Under processens gång har färdiga CAD-modeller av standardkomponenter använts för

att spara tid och hålla arbetet standardiserat, exempelvis skruvar och kugghjul. Alla komponenter har hämtats från McMaster då de har ett stort utbud med färdiga CAD-modeller av alla sina komponenter, (McMaster, 2025).

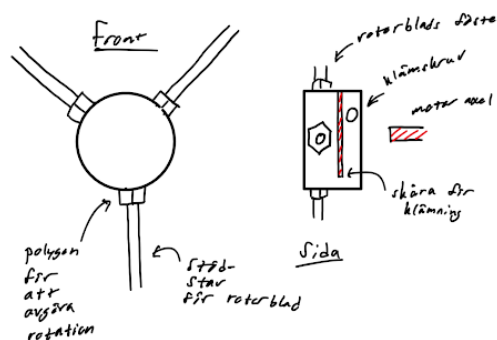
3.5.1 Iterationer

Iteration ett var det första idéstadiet där många tankar och problem först togs fram. Initialt var tanken att klämma fast motorn i en låda som i sig klämdes fast på ett torn, se nacell i figur 3.3a. Rotornavet hade tre polygonformade styrtavlar på mantelytan, varpå rotorbladen kunde skjutas på i olika vinklar. Navet skulle sedan monteras på motoraxeln med en klämhylsa, se figur 3.3b.

Denna konstruktion var för enkel och uppfyllde inte alla projektmål. De tillverkningstoleranser som skulle krävas för att styrtavarna skulle kunna användas för att ställa bladen i exakta vinklar ansågs inte praktiskt möjliga att uppnå. Dessutom var konstruktionen sannolikt inte tillräckligt hållfast. Motorinfästningen var också onödigt komplex, eftersom det ansågs säkrare och enklare att skruva fast motorn istället för att klämma den. Rent estetiskt lämnade också konstruktionen mycket att önska.



(a) Första iterationens nacell.

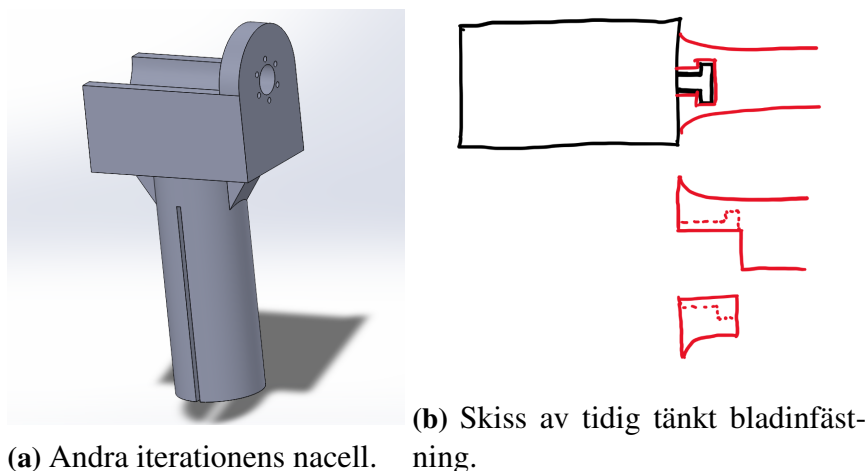


(b) Skiss av navkonstruktion.

Figur 3.3: Iteration 1: 3D-modell av nacell och skiss av navets konstruktion.

I den andra iterationen, vilken kan ses i figur 3.4, implementerades skruvfästning för motorn. Nacellen gavs också en mer rundad form samt diagonala stöd mot tornet för att öka hållfastheten. Den polygonala bladstyrningen gjordes cylindrisk, för att istället fritt kunna ställa bladvinkel och sedan klämmas fast.

Den cylindriska bladinfästningen övergavs senare eftersom att den gav upphov till stora spänningshöjare och innebar stor risk för brott i bladet. Dessutom var det mycket omständligt och oprecist att justera bladvinkeln individuellt. Nacellen var fortfarande inte tillräckligt aerodynamisk och ansågs inte vara estetiskt tillfredsställande.



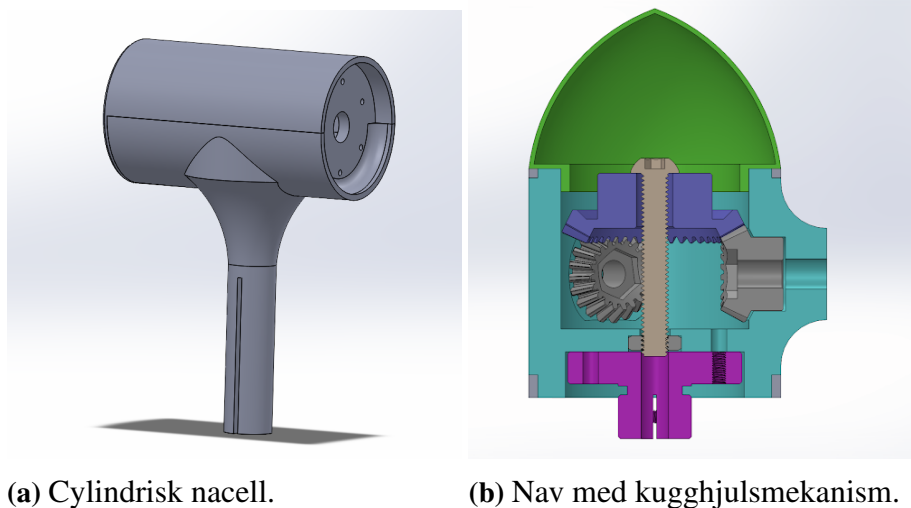
Figur 3.4: Iteration 2: 3D-modell av nacell och skiss av bladinfästning.

Iteration tre var den första mer utvecklade konstruktionen. Konstruktionen hade en cylindrisk nacell, och i navet användes kugghjul för att rotera alla tre blad samtidigt, se figur 3.5. Den cylindriska formen gjorde modellen mer aerodynamisk och estetiskt tilltalande. Locket över motorn fästes endast med friktion, med tanken att det inte utsätts för några stora krafter.

Den nya konstruktionen för att ställa bladvinkeln kom från behovet att få en gemensam vinkel för alla blad och för att förenkla justeringsmomentet vid vindtunneltester. Bladet vilade mot ett, från navets mantel, utskjutet plan och dess vinkel låstes genom att ett centralt kugghjul klämdes mot bladens kugghjul, i motorns riktning, med en genomgående skruv. Navet i sig kopplas till motoraxeln med en klämhylsa som skruvas in i navet. I figur 3.5 illustreras nacellens utformning och en genomskärning av navet.

3. Metod

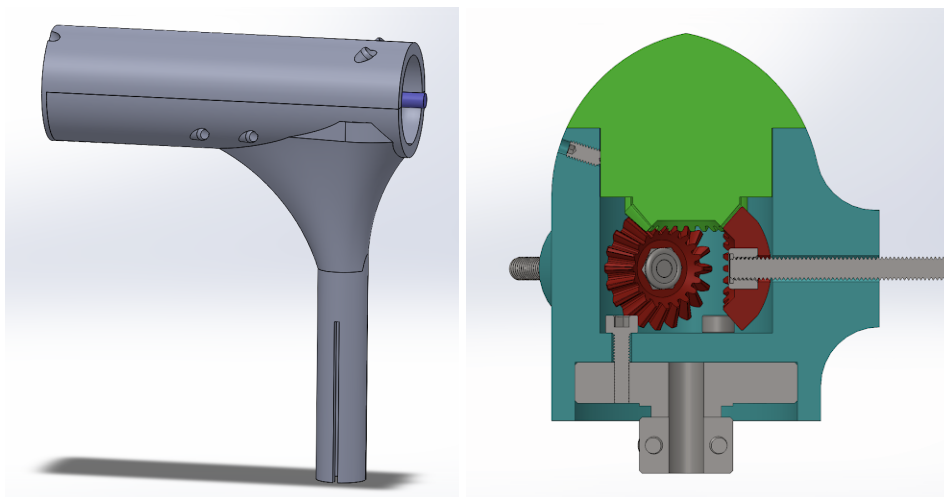
Denna iteration hade två stora svagheter. Dels blev navet större för att göra plats för de interna kugghjulen, vilket i praktiken skulle ge kortare rotorblad. Dessutom var tanken att bladen skulle monteras permanent till kugghjulen, för att säkerställa en korrekt vinkel. Detta skulle innebära att navet skulle behöva byggas om helt om exempelvis ett blad gick sönder.



Figur 3.5: Iteration 3: 3D-modell av cylindrisk nacell och genomskärning av nav med intern kugghjulsmechanism för bladvinkeljustering.

I den fjärde iterationen gavs nacellen luftintag för att säkerställa tillräcklig motorkylning under drift. Dessutom förlängdes nacellen, eftersom det antogs att motorn skulle kräva en växellåda, se figur 3.6. Stödet under motorfästet förlängdes också för att bättre motverka momentkrafter vid högre vindhastigheter. Det centrala kugghjulet integrerades i noskonen för att spara utrymme och underlätta justeringen av bladvinkel. Tre vinklade ställskruvar användes för att låsa noskonens rotation och därigenom fixera justeringsmekanismen. De tre mindre kugghjulens utformning ändrades också för att kunna öka navets vägg tjocklek och således öka hållfastheten.

Problem med denna design var fortfarande modulariteten men också att det var mycket svårt att ställa samma nollvinkel för bladen utan att vid montering limma bladen i rätt vinkel med hjälp av en jigg. Det fanns också en risk att krafterna under drift skulle bli för stora för ett 3D-utskrivet nav i plast.

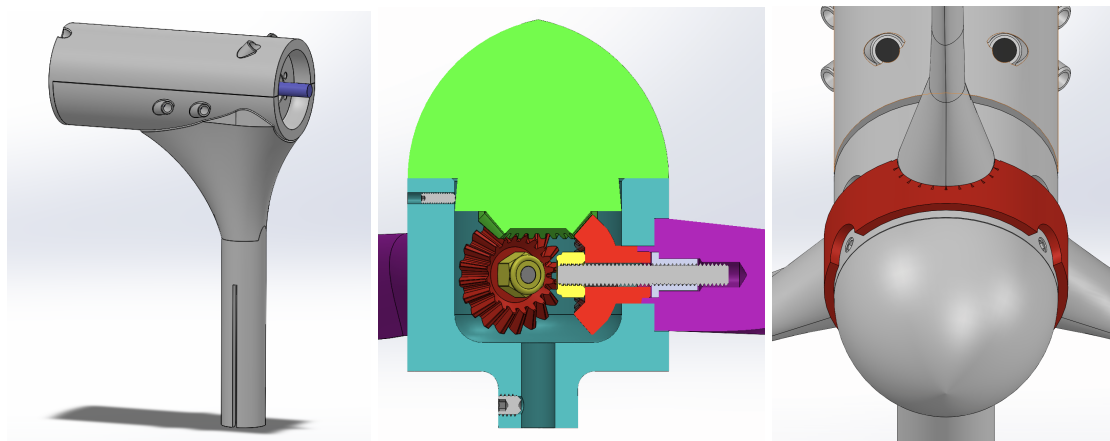


(a) Nacell med utrymme för väx- (b) Nav med integrerat centralkugg-
ellåda. hjul.

Figur 3.6: Iteration 4: 3D-modell av cylindrisk nacell för motor med växellåda och genomskärning av nav med centralkugghjul integrerat i noskonen.

Iteration fem innebar flera stora förändringar. Främst av dessa var att konstruktionen av navet, den ihåliga del som huserar vinkeljusteringsmekanismen, anpassades för att tillverkas i aluminium. Genom att använda aluminium istället för plast ökade hållfastheten avsevärt, vilket eliminerade behovet av de utskjutna ytorna som bladen tidigare vilade på. Således kunde bladen göras längre. Det nya materialet gjorde det också möjligt att integrera klämhylsan i navet, så dess total längd kunde reduceras. För att lättare kunna ställa bladens nollvinkel direktkopplades rotorbladen till kugghjulen. Samtidigt innebar detta att blad och kugghjul inte längre klämdes på samma sätt mot navets väggar. Detta reducerade friktionen och minskade motståndet i mekanismen vid justering. För att ställa in rätt bladvinkel gjordes en markering för nollvinkeln på bladet och sedan användes en mall med vinkelmarkeringar som tillfälligt monterades på navet. Mallen passar över de tre bladen och har markeringar för vinklar i 15°-intervall. Bladets vinkel ställs mot dessa och mallen tas av.

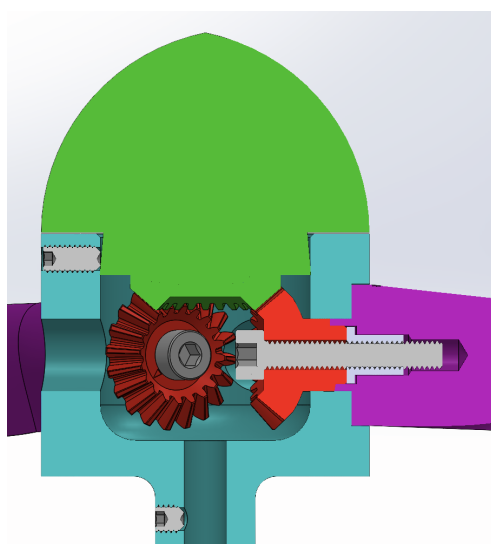
Eftersom det visade sig att växellåda inte skulle användas reducerades nacellens längd. Luftintagen justerades för att förbättra motorkylningen. Den femte iterationen av både nacell och nav, samt vinkelmallen visas i figur 3.7.



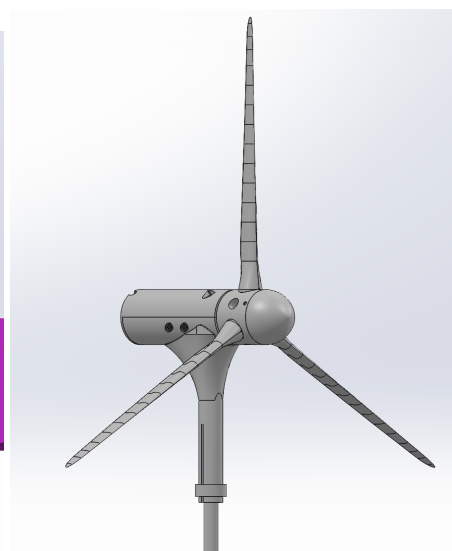
(a) Kort nacell för motor ut- (b) Navkonstruktion för till- (c) Vinkelmallen monterad an växellåda. verkning av nav i aluminium. på navet.

Figur 3.7: Iteration 5: 3D-modell av cylindrisk nacell och genomskärning av nav med intern kugghjulsmechanism. Den turkosa delen av navet tillverkas av aluminium. Vinkelmallen används för att ställa bladets angreppsvinkel

Till den sjätte generationen gjordes endast mindre justeringar. Förbanden med gängstång och mutter ersattes med skruvar. För att göra det enklare att med verktyg dra åt skruvarna togs hål upp på motsatt sida navet. Ställskruvarna som håller noskonen gjordes större för att öka deras livslängd. Detta medförde också att de nu kan dras åt med samma verktyg som för skruvarna som fäster navet på motoraxeln. Nacellen justerades inte. I figur 3.8 syns en genomskärning av den sjätte iterationens navkonstruktion, samt en 3D-modell av slutgiltiga sammansatta vindkraftverksmodellen.



(a) Sjätte iterationens navkonstruktion.



(b) Sammanställd slutgiltig vindkraftverksmodell.

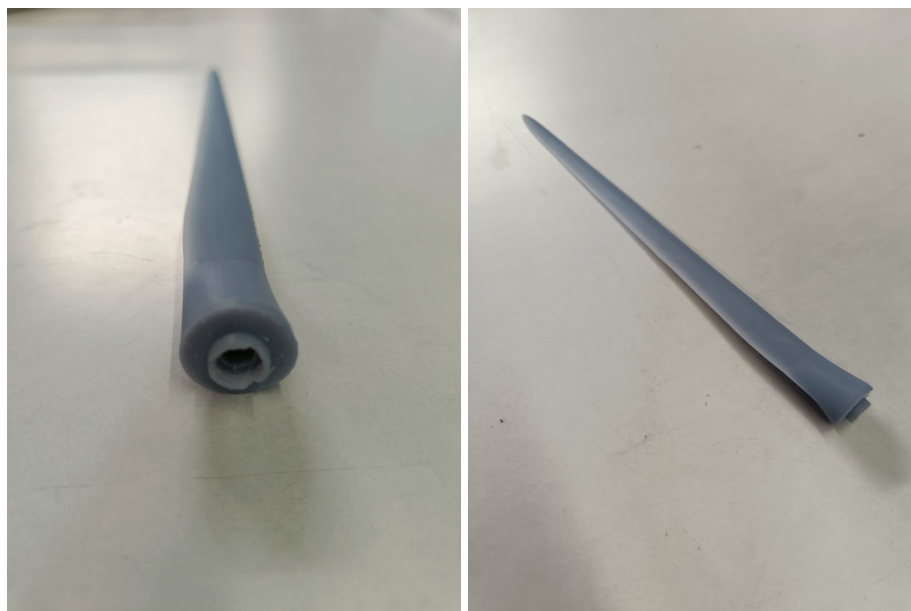
Figur 3.8: Iteration 6: Genomskärning av sjätte generationens nav samt 3D-modell av den sammanställda konstruktionen av vindkraftverksmodellen.

Den sjätte iterationen var den som slutgiltigt gjordes till en komplett modell och användes i vindtunneltesterna. En sprängskiss av den sjätte generationens modell visas i figur D.1 i appendix. De tidigare iterationerna användes för att göra tidiga tester på modeller och för att få en överblick på hur bra de kommer utföra sina uppgifter. Med den informationen kunde sedan en bättre iteration tas fram och slutligen framkom iteration sex som gick vidare till tillverkningsstadiet.

3.6 Tillverkning

I huvudsak tillverkades modellen additivt med 3D-skrivare. Initialt användes filamentskrivare för prototyp tillverkning, men rotorbladens spetsar visade sig vara för tunna för filamentskrivaren. Den klarade inte av att återge geometrin med tillräcklig precision. Dessutom visade det sig att flera av komponenternas geometrier generellt inte uppnådde önskad noggrannhet med filamentskrivare. Därför användes en SLA-skrivare för att tillverka bladen, noskonen och kugghjulen, där högre detaljupplösning krävdes. Blad kan ses i figur 3.9. Noskonen och kugghjul visas i figur 3.10.

SLA, eller stereolitografi, är en additiv tillverkningsmetod som använder flytande härdplast som selektivt bestrålas med ultraviolett ljus för att härda materialet och således, lager för lager, framställa en tredimensionell form (Prototal AB, 2025). I arbetet användes SLA-skrivaren Anycubic Photon Mono M5s pro och härdplasten Anycubic high speed resin 2.0. Utskrifterna fick varierande kvalitet till en början men efter ett antal utskrifter och justering av skrivarens inställningar förbättrades resultatet.



(a) Blad sett från infästningen.

(b) Blad sett från sidan.

Figur 3.9: Blad utskrivet med SLA-skrivare.

3. Metod

Bladprofilerna är baserade på rapporten *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development* (Jonkman, 2009). Filerna för bladen är hämtade från en Google Drive som finns länkad i ett diskussionsforum av National Renewable Energy Laboratory (2023) och har därefter modifierats för att passa i konstruktionen. I figur 3.9a så syns infästningen som passar ihop med navet. I hålet så limmades en gänginsats in för att kunna skruva ihop bladet med kugghjulet. Det går även att se de triangelformade kopplingarna som passar ihop med kugghjulen. I figur 3.9b går det att se en ljusare nyans i materialet längs den ena sidan av bladet. Det beror på att bladet är smalast på den sidan. Bladen slipades också med sandpapper för att få bort rester från stödstrukturen från 3D-skrivningen.



Figur 3.10: Noskon och kugghjul utskrivna med SLA-skrivare.

Noskonens och kugghjulens utformning syns i figur 3.10. Kuggtänderna som syns är utformade för att passa med varandra. I figur 3.10d så syns den triangelformade kopplingen som passar ihop med bladet. I kugghjulet går det att se det genomgående hålet där skruven träs in för att skruva ihop bladet med kugghjulet.



(a) Nav sett snett framifrån.

(b) Nav sett från sidan.

Figur 3.11: Nav i aluminium med ställskruvar.

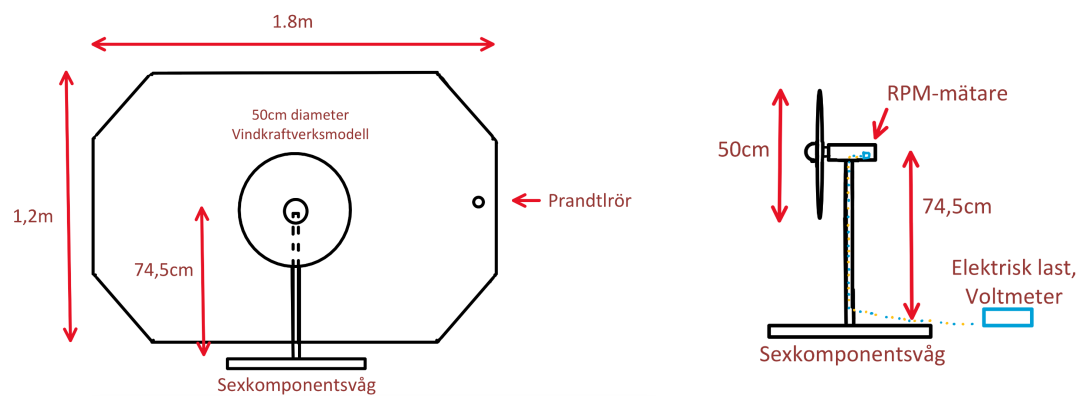
Navet, som visas i figur 3.11, är den centrala delen i navkonstruktionen och tillverkades i aluminium av tredje part. Navet har gängade hål för ställskruvar som dels låser noskonens rotation, samt håller fast navet på motoraxeln.

3.7 Datainsamling från vindtunnel

För att utvärdera prototypens aerodynamiska och strukturella egenskaper genomfördes experimentella tester i Chalmers vindtunnel. De primära parametrar som studerades var effektuttag, rotationshastighet, aerodynamiska krafter och mekanisk hållfasthet. Mätningarna utfördes under varierande förhållanden, såsom elektrisk last, vindhastighet och bladvinkel, för att efterlikna realistiska driftsscenarioer.

Vindtunneln var utrustad med integrerade kraft och momentsensorer i form av en sexkomponentsvåg, vilket möjliggjorde mätning i samtliga tre rumsdimensioner. För registrering av rotationshastigheten installerades en RPM-mätare bestående av två magneter på motoraxeln. Vid varje rotation genererade denna en elektrisk impuls som registrerades med hjälp av ett oscilloskop, vilket möjliggjorde kontinuerlig övervakning av RPM. Spänningen mättes med multimeter, och tillsammans med den kända resistansen kunde den elektriska effekten beräknas enligt formeln $P = \frac{U^2}{R}$. Ett prandtlrör integrerat i vindtunneln ansvarade för att ge kontinuerlig övervakning av vindhastighet. Se figur 3.12 för skiss av vindtunnel och mätinstrument.

3. Metod



(a) Modellen sedd framifrån.

(b) Modellen sedd från sidan.

Figur 3.12: Skisser över testkonfiguration i vindtunneln.

De inledande mätserierna syftade till att verifiera funktionaliteten hos sensorer och elektronik samt säkerställa modellens strukturella integritet. Mätningarna kompletterades med visuell observation och videodokumentation. Figur 3.13 visar modellen i vindtunneln vid de första testerna.



Figur 3.13: Modellen under det första vindtunneltestet.

Under testerna varierades tre huvudparametrar: vindhastighet, bladvinkel och resistans. En första mätserie syftade till att identifiera den bladvinkel som gav maximalt effektuttag. Detta gjordes genom att variera vinkeln i steg om 15° , medan övriga parametrar

hölls konstanta. När optimal bladvinkel identifierats genomfördes en motsvarande mätserie där resistansen varierades. De använda resistansvärdena var 2,5 Ω , 5 Ω , 10 Ω , 15 Ω och 26,3 Ω . För varje kombination av parametrar genomfördes mätningar vid vindhastigheterna 3, 6, 9, 11,4, 13 och 15 m/s. Vissa mätserier utfördes även med tätare intervall eller överstigande 15 m/s i vindhastighet för att möjliggöra grafer med högre upplösning.

Utöver dessa standardiserade mätningar genomfördes även tester vid vindhastigheter upp till 20 m/s samt med tornet vridet 45° från vindriktningen, i syfte att studera prototypens hållfasthet under mer extrema och realistiska förhållanden.

För att kunna jämföra den uppmätta datan med den valda referensdatan i figur 3.2 var det nödvändigt att införa en begränsning på den utvunna effekten. Syftet var att simulera ett driftförhållande där motorns maxeffekt utgjorde en begränsande faktor. Eftersom modellen i praktiken inte uppnådde tillräckligt hög verkningsgrad eller effektutvinning för att närma sig motorns maximala kapacitet, infördes istället ett artificiellt effekttak på cirka 0,8 W. Därefter genomfördes tester vid den tidigare identifierade optimala bladvinkeln, där vindhastigheten gradvis ökades tills effekttaket nåddes. För att möjliggöra tester vid ännu högre vindhastigheter utan att överskrida den satta gränsen, justerades sedan bladvinkeln till en något mindre effektiv inställning.

4

Resultat

Detta kapitel redovisar de resultat som tagits fram under projektets gång. Resultaten presenteras i fyra huvuddelar: beräkningsresultat, motorkalibreringsresultat, modellresultat samt resultat från vindtunnel. Beräkningsresultaten utgör grunden för de initiala designvalen och bygger på teoretiska antaganden. Motorkalibreringsresultaten ligger till grund för förståelsen av systemets elektriska prestanda och styrning. Modellresultaten beskriver utvärderingen av den fysiska prototypen, och vindtunnelresultaten redovisar de tester som genomförts. Tillsammans ger dessa delar en helhetsbild av projektets tekniska utfall.

4.1 Beräkningar och simuleringssresultat

Resultaten från prestanda- och hållfasthetsberäkningarna, samt flödessimuleringen, sammanfattas nedan. Dessa resultat har utgjort grund för val av geometri, material samt för bedömningen av modellens strukturella integritet. Prestanda- och hållfasthetsvärdena har beräknats utifrån ett definierat driftförhållande och baseras på ett antal förenklande antaganden. De framtagna värdena är teoretiska och har främst använts som stöd för designbeslut och som referens för de kommande experimentella testerna på den fysiska prototypen.

4.1.1 Prestandasresultat

För att utvärdera modellens effektivitet, samt analysera genomförbarhet med vald motor har prestanda analyserats vid en antagen jämn vindhastighet på 11,4 m/s. De mest relevanta nyckelparametrarna har beräknats och presenteras i tabell 4.1. Dessa parametrar ger en helhetsbild av modellens energiomvandling, från tillgänglig vindenergi till elektrisk effekt, samt belastningen på strukturen.

4. Resultat

Tabell 4.1: Beräknade nyckelparametrar vid 11,4 m/s.

Parameter	Symbol	Värde	Enhet	Kommentar
Framdrivningsförhållande	J	0,514	–	Beräknad från vindhastighet
Tillgänglig vindenergi	P_{wind}	142,4	W	
Modellens mekaniska effekt	P_{turbine}	64,1	W	$C_p \approx 0,45$
Elektrisk effekt	P_{el}	54,5	W	$\eta_{\text{gen}} = 0,85$
Vridmoment	M_{vrid}	0,21	Nm	
Skivbelastning	SB	69,54	N/m ²	$C_T \approx 0,89$
Totala horisontella krafter	F_{total}	1,24	N	
Moment vid motorhus	$M_{\text{böj}}$	0.92	Nm	

4.1.2 Hållfasthetsresultat

I hållfasthetsberäkningarna analyserades ett värsta scenariot där vindhastigheten är på cirka 20 m/s och ett varvtal på 3000 RPM. Vilket är motsvarande det högsta testade varvtalet för generatoren. Under dessa förhållanden erhöles följande resultat:

Tabell 4.2: Hållfasthets- och dynamiska parametrar vid extrem belastning.

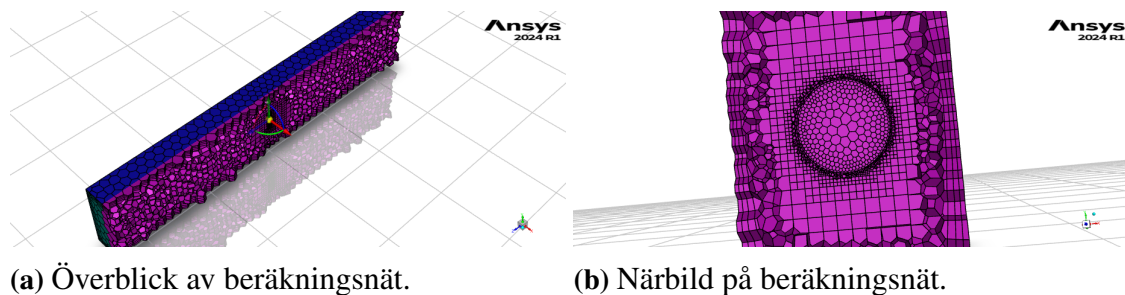
Parameter	Symbol	Värde	Enhet	Kommentar
Böjning i torn (topp)	δ	0,17	μm	
Böjspänning i rotorblad	$\sigma_{\text{böj}}$	1,52 - 37,2	MPa	
Dragspänning (centrifug)	σ_{drag}	71,3	kPa	
Egenfrekvens (torn)	f_n	24,6	Hz	
Bladpassagefrekvens	f_{BPF}	150	Hz	3×50

Vid jämförelse mellan tabell 4.2 och materialdata för SLA-härdplast (böjhållfasthet ~ 52 - 65 MPa och draghållfasthet ~ 37 - 47 MPa) visar att säkerhetsmarginalen är mycket god. Böjningen utav stålröret blev mindre än 1 mm vid värsta scenariot, vilket bedömdes vara tillräckligt styvt för vindtunneltestningen. Dessutom är det ingen risk för resonans då egenfrekvens och bladpassagefrekvens skiljer sig markant när man kör på 3000 RPM.

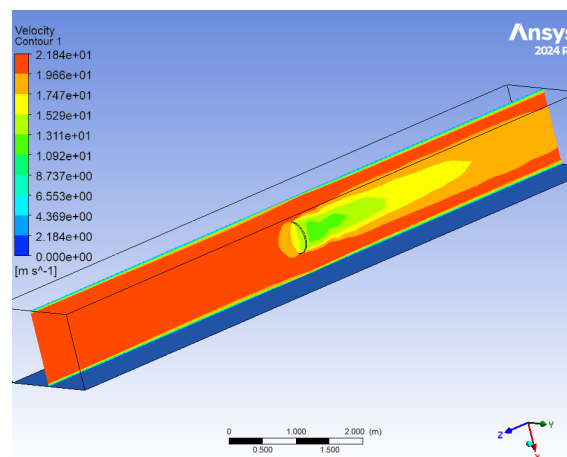
Den uppmätta massan för modellen uppgick till 949 gram, vilket tillsammans med tornets styvhet bestämmer dess egenfrekvens. Med en beräknad egenfrekvens på 24,6 Hz är det av stor vikt att undvika en rotationsfrekvens på en tredjedel av egenfrekvensen, det vill säga 8,2 Hz. Eftersom modellen har tre rotorblad innebär detta att bladpassagefrekvensen blir tre gånger rotationsfrekvensen. Beräkningarna visar att den föreslagna designen är hållbar för både normal drift och extrema förhållanden i vindtunneln.

4.1.3 Flödessimulering

För att hålla blockeringen av vindtunnelns tvärsnitt under 10% valdes inledningsvis en rotordiameter på 50 cm vilket motsvarar 9,1% av vindtunnelarean. Simuleringen visade en minskning av flödes hastighet på omkring 17% genom disken, vilket bedömdes som acceptabelt med hänsyn till projektets syfte och begränsningar. För att kunna analysera flödesfältet i vindtunneln modellerades turbinen som en actuator disk. Det resulterande beräkningsnätet visualiseras i figur 4.1, där en högre upplösning tydligt syns i området kring disken för att fånga relevanta flödesvariationer.



Figur 4.1: Beräkningsnät från flödessimulering.



Figur 4.2: Actuator disk-flöde.

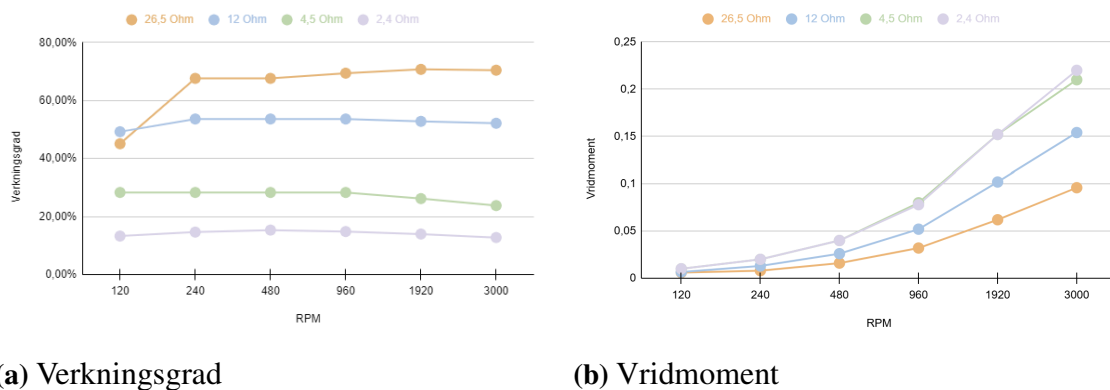
Den simulerade flödesprofilen längs vindtunneln visas i figur 4.2. Här framgår tydligt hur flödes hastigheten reduceras direkt bakom disken, vilket är ett väntat resultat av den tryckdifferens som skapas av diskmodellen. Dessa resultat utgör ett värdefullt underlag för att förstå påverkan av modellens storlek och placering i tunneln, och kommer att användas som referens i den vidare analysen av mätdata från fysiska tester.

4.2 Motorkalibrering

Datan från motorkalibreringen indikerar att den preliminärt valda motorn kommer att fungera för syftet. Detta baserades på att den kunde leverera en rimlig effekt för de varvtal

4. Resultat

och vridmoment som beräknats. Figur 4.3a visar verkningsgraden för motorn vid varierande varvtalet och resistans. I figuren syns det hur verkningsgraden påverkas minimalt av varvtalet, medans resistansen har en stor påverkan. En högre resistans innebär att mindre ström går igenom motorn. Detta leder till minskade förluster i motorkretsen, vilket i sin tur ger en högre verkningsgrad.



Figur 4.3: Motorns verkningsgrad och vridmoment i testriggen för 4 olika resistorer, som funktion av RPM. Datan är tagen från motorkalibreringen, för motorns fullständiga datablad se tabell A.1.

I figur 4.3b framgår att motorns vridmoment ökar icke-linjärt med varvtalet. Kalibreringen visade dessutom att motorn utan problem klarade de uppmätta vridmomentnivåerna. Därför bedömdes det inte nödvändigt att ta hänsyn till detta vid vindtunneltesterna.

4.3 Modell

Den slutgiltiga modellen baseras på ett svarvat nav i aluminium som beställdes från en extern leverantör. Syftet med detta är att säkerställa god strukturell hållfasthet i den centrala komponenten som utsätts för störst stress. För ytterligare mekanisk robusthet och problematik med att skapa gängor i plastmaterial valdes skruvar och gänginsatser också i metall. Övriga komponenter tillverkades med 3D-skrivare, antingen SLA-baserad eller extruderande. SLA-tillverkade komponenter inkluderar noskon, kugghjul och blad då dessa kräver högst noggrannhet. Extrudering användes för nacellen samt dess fäste då dessa inte behövde samma precision eller hållfasthet och det sparade tid att printa. Toronet tillverkades av ett stålrör, som sladdarna till motorn och varvtalsmätaren kunde föras genom.

Noskonen fungerar som ett huvudkugghjul som är kopplat vinkelrätt till tre mindre kugghjul. Dessa tre mindre kugghjul är direkt kopplade till bladen genom navets väggar med skruvar, det låter bladens rotation låsas med varandra och noskonen. Denna lösning möjliggjorde samtidig och enhetlig justering av bladens angreppsvinkel genom rotation av noskonen. Infästningen av noskonen har en svag lutning, som tillsammans med låsskruvar som går genom navet både låser fast angreppsvinkeln och håller konen på plats. Se figur 3.7b för visualisering.

I bladen installerades gänginsatser för att möjliggöra säker montering med skruv. Både kugghjul och blad har tre matchande triangulära uttag respektive tänder, detta säkerställer att angreppsvinkeln kan justeras exakt lika för samtliga blad.



(a) Modellen sedd framifrån



(b) Modellen sedd snett framifrån

Figur 4.4: Slutgiltiga modellen

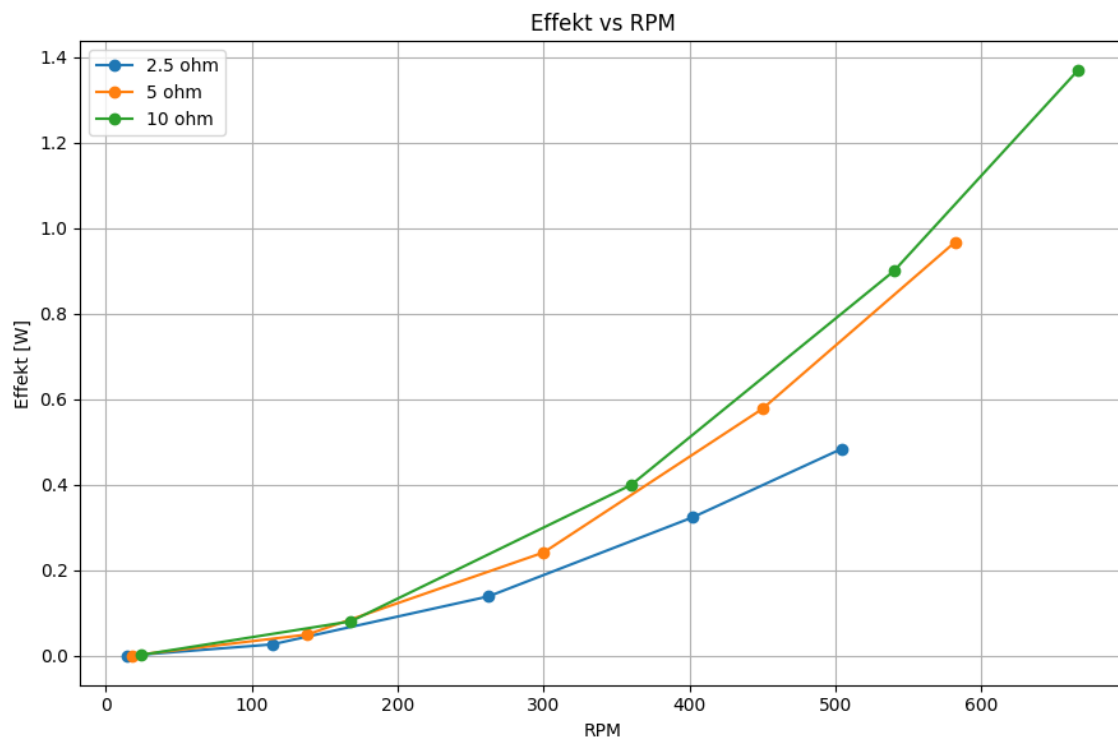
Motorn fästs vid navet med hjälp av två låsskruvar på motoraxeln. Motorn monteras i en 3D-skriven nacell, som i sin tur fixeras på tornet med hjälp av klämkraft. Nacellen försågs med ventilationshål och kanaler för att leda luft över motorn för att förhindra överhettning. En skåra i nacellens bottendel skapades för att leda kablar från mätutrustningen ned genom tornet. I figur 4.4 visas den slutgiltiga modellen från två olika vinklar.

4.4 Vindtunneltester

För att utvärdera projektets framgång genomfördes två testomgångar i Chalmers vindtunnel. Det första testet hade som främsta syfte att verifiera modellens grundläggande funktionalitet samt att identifiera eventuella förbättringsområden. Den andra testomgången byggde vidare på insikter från den första och fokuserade i högre grad på att samla in mer precisa mätdata, vilka kan användas för jämförelser med referensvärden från tidigare studier.

4. Resultat

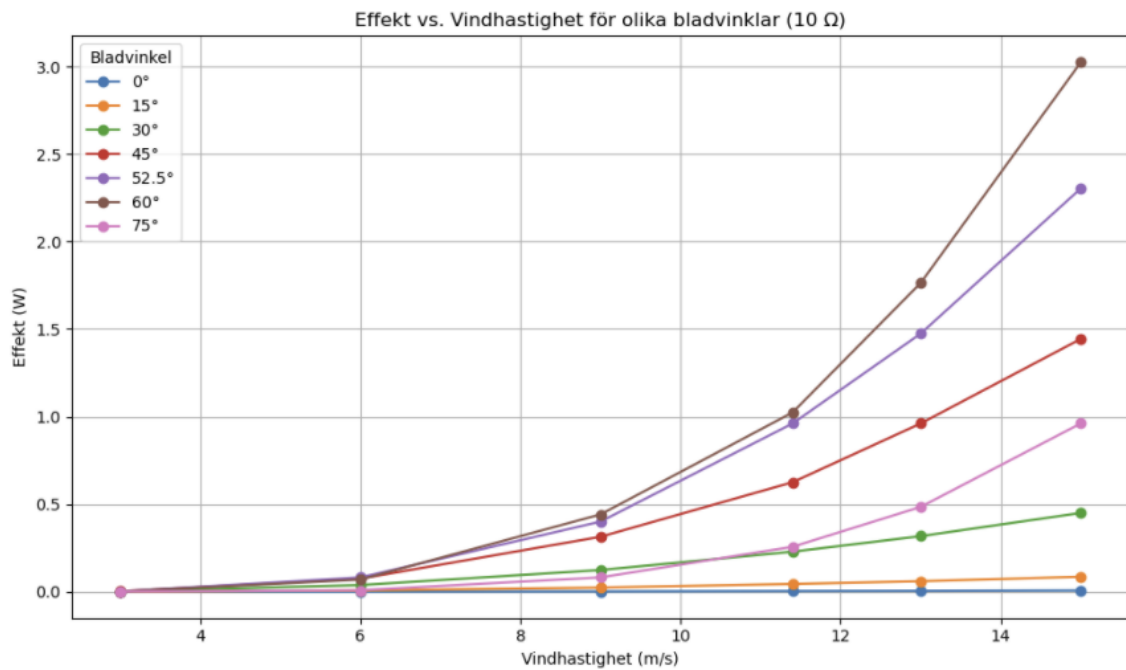
Mätserierna från det första vindtunneltestet bekräftade att prototypen fungerar väl för att generera experimentell data kring hur bladvinkel, vindhastighet och resistans påverkar nyckelparametrar såsom rotationshastighet, effektuttag och mekanisk hållfasthet. Data från det första genomförda testet visualiseras i figur 4.5.



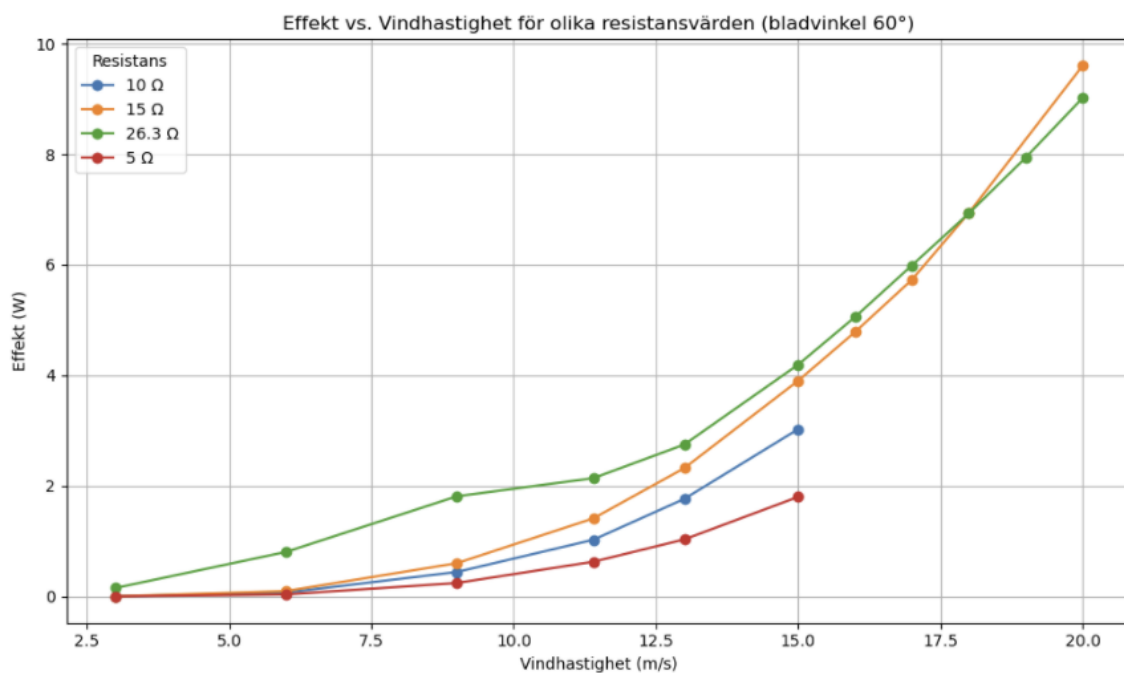
Figur 4.5: Effekt som funktion av RPM för tre olika resistanser, vid 45° bladvinkel i vindtunneltest 1.

Det andra testet omfattade mer detaljerade mätningar och syftade främst till att undersöka den optimala bladvinkeln samt att kartlägga modellens prestanda i form av verkningsgrad (C_p) och effektutvinning vid olika driftförhållanden. Eftersom modellens primära syfte är att studera aerodynamiska egenskaper snarare än att maximera effektproduktion, låg fokus på att uppnå realistiskt beteende i mätvärdena snarare än att nå högsta möjliga effekt.

Tester visade att den högsta verkningsgraden uppnåddes vid en bladvinkel på 60° relativt den definierade nollvinkeln, se figur 4.6. Det är dock viktigt att notera att denna vinkel endast är relaterad till modellens egen referensvinkel, och inte direkt kopplad till vindens inflödesriktning. För visualisering av hur nollvinkeln avgörs se figur 3.7c. Vid denna vinkel genomfördes ytterligare tester med varierande elektrisk belastning, där en resistans på $26,3 \Omega$ visade sig ge den högsta effektutvinningen bland de testade alternativen, se figur 4.7. Sammanfattningsvis bedömdes att modellens mest gynnsamma driftförhållanden, inom ramen för testen, utgjordes av en bladvinkel på 60° i kombination med en belastning på $26,3 \Omega$.



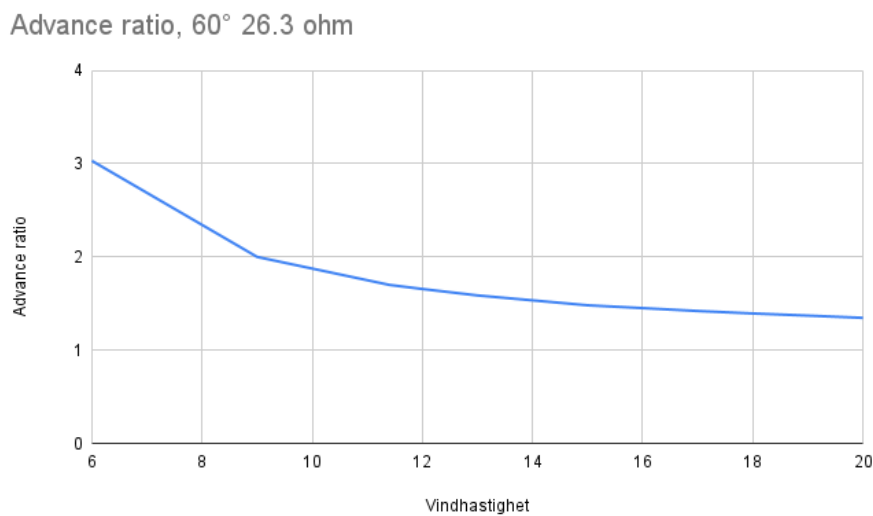
Figur 4.6: Effekten som funktion av vindhastighet för varierande bladvinkel.



Figur 4.7: Effekten som funktion av vindhastighet för varierande resistans.

Mätdata från vindtunneltesterna vid det optimala driftförhållandet visar att framdrivningsförhållandet varierade mellan 3,0 till 1,35 när vindhastigheten gick från 6 m/s till 20 m/s och kan ses i figur 4.8.

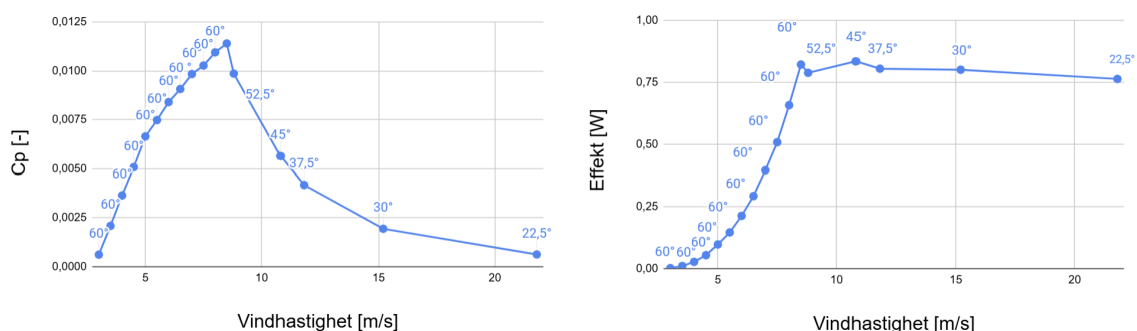
4. Resultat



Figur 4.8: Beräknat framdrivningsförhållande för en bladvinkel på 60°, med 26,3 ohm resistans.

Krafter och moment på modellen är i linje med de preliminära beräkningarna. De totala horisontella krafterna avlästes från sexkomponentsvågen initialt vid 11,4 m/s och varierade mellan cirka 0,9 och 1,8 N, beroende på aktuellt vridmoment. Totalt moment varierar mellan 0,44 och 1,13 Nm. De högsta värdena erhöles vid 20 m/s, och uppgick till 5,3 N och 3,13 Nm. Krafter och moment i övriga dimensioner är små, cirka 1-3 % av de som uppstod i vindens riktning. För mätningen med tornet vridet 45° erhöles ungefär lika stora krafter och moment i vindriktningen som i sidolead. För fullständig data, se bilaga B.13. Från de uppmätta horisontella krafterna kan ett värde på dragkraftskoefficienten C_T beräknas. Vid 1,8 N blev det resulterande värdet $C_T \approx 0,12$.

Testerna med den simulerade begränsande effekten resulterade i två grafer som visualiserades i figur 4.9. Bladvinkeln visas som gradtal vid respektive mätpunkt i graferna.

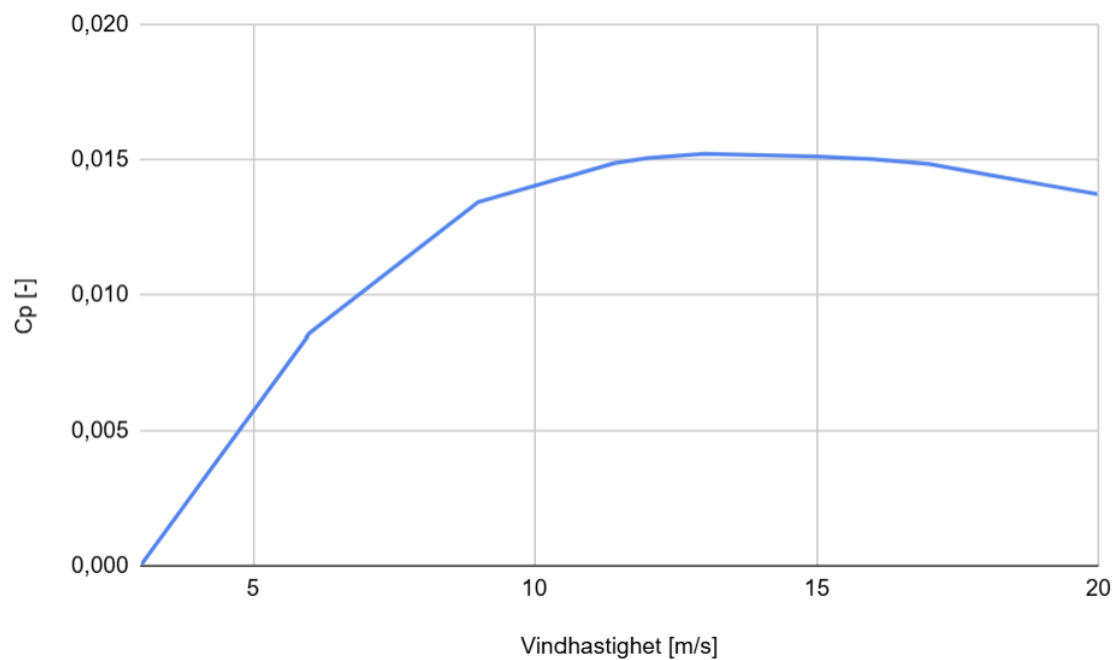


(a) C_p mot vindhastighet där bladvinkel anpassats för att snabbt uppnå och därefter bibehålla en fix effekt

(b) Effekt mot vindhastighet där bladvinkel anpassats för att snabbt uppnå och därefter bibehålla en fix effekt

Figur 4.9: C_p samt effekt från vindtunneltest två, för 26,3 Ω och varierande bladvinkel.

Den vänstra grafen visar hur vindkraftverkets verkningsgrad C_p ($= \frac{P_{turbine}}{P_{wind}}$) varierar mot olika vindhastigheter där $P_{turbine}$ är utvunnen effekt utav vindkraftverket och P_{wind} är möjlig energi man kan utvinna ur vinden. Då C_p inte tar hänsyn till generatorns verkningsgrad har den resulterande effekten justerats med en faktor 0,7, baserat på de uppmätta värdena i figur 4.3a. Den högra grafen visar hur den utvunna effekten varierar mot olika vindhastigheter. Det framgår tydligt från graferna att vid 8,5 m/s så byter de mönster. Detta eftersom att vid den vindhastigheten uppnådde modellen den begränsande effekten och vinkel ställdes om till en mindre effektiv. En mindre effektiv vinkel resulterar i att modellen producerar mindre effekt och på så sätt håller sig under effekt-taket.



Figur 4.10: C_p -kurva med 60° bladvinkel med 26,3 ohm.

Figur 4.10 illustrerar hur mycket energi som kan utvinnas från vinden i takt med att vindhastigheten ökar. Den högsta verkningsgraden uppnås vid en vindhastighet mellan cirka 11,4 och 13 m/s. Därefter planar verkningsgraden ut och börjar sedan minska vid ytterligare ökande vindhastigheter.

5

Diskussion och Slutsats

Detta kapitel sammanfattar och reflekterar över projektets resultat. Inledningsvis förs en diskussion kring arbetets genomförande, resultatens tillförlitlighet och identifierade begränsningar. Därefter presenteras förslag på möjliga förbättringar samt fördjupade forskningsinriktningar som kan utveckla projektet vidare. Kapitlet avslutas med en slutsats där projektets uppfyllelse av målsättningar bedöms.

5.1 Diskussion

I diskussionen behandlas hur väl den teoretiska modellen stämmer överens med de praktiska resultaten från vindtunneltester. Det diskuteras hur konstruktionen presterar under verkliga förhållanden, inklusive hållfasthet, aerodynamiska egenskaper och elproduktion. Även materialval, mekanisk hållbarhet, och precision i justeringssystemet för bladvinklar utvärderas. Brister och förbättringsområden identifieras, såsom behovet av ökad noggrannhet i vinkelinställningar och mer hållbara komponenter. Dessutom diskuteras begränsningar i testmiljön och hur dessa påverkar mätdata, särskilt i relation till skalning och verkningsgrad. Slutligen förs resonemang om hur modellen kan vidareutvecklas för att möjliggöra mer tillförlitliga och detaljerade mätningar i framtiden.

5.1.1 Beräkningar

Resultaten visar att turbinen teoretiskt sett kan generera cirka 54,5 W elektrisk effekt under specificerade förhållanden, vilket bekräftar att en direkt driven generator är genomförbar utan växellåda. Vridmomentet och den horisontella kraften ligger också inom rimliga gränser för en småskalig modell, vilket talar för att vindtunnelblockeringen inte är kritisk. Sammanfattningsvis indikerar analysen att turbinens design är väl anpassad för den aktuella driftmiljön.

Jämförelse med materialdata för SLA-härdplast (böjhållfasthet $\sim 52-65$ MPa och draghållfasthet $\sim 37-47$ MPa) visar att säkerhetsmarginalen är mycket god. Dessutom är det ingen risk för resonans då egenfrekvens och bladpassagefrekvens skiljer sig markant. Beräkningarna visar att den föreslagna designen är hållbar för både normal drift och extrema förhållanden i vindtunneln.

De krafter som beräknas för kraftverket såsom böjmoment i tabell 4.1 korrelerar med de värden som gavs av sexkomponentsvågen under vindtunneltester, se appendix B.13 där vindhastigheten är 11,4 m/s och resistansen är 26,3 Ω . Detta visar på att de antaganden och beräkningar som användes var rimliga och resultaten stämmer överens med bakomliggande teori och förväntade krafter därifrån.

5.1.2 Motorkalibrering

Generellt uppvisar motorn en relativt stabil verkningsgrad inom det undersökta varvtalsintervallet, med ett undantag vid 26,5 Ω och 120 RPM. Denna avvikande punkt kan vara resultat av lågt motstånd och låga varv, vilket då inte kan producera tillräcklig effekt för att följa trenden. Resultaten tyder även på att högre resistans tenderar att ge högre verkningsgrad. Kalibreringen gav därmed vägledning kring vilka resistansvärden som var relevanta att använda i vidare tester.

Det plana förloppet hos kurvorna antyder att verkningsgraden i stort sett är oberoende av varvtalet inom det aktuella intervallet. Detta innebär att varvtalet inte utgav en begränsande faktor vid val av driftpunkt i den fortsatta analysen.

5.1.3 Slutgiltig modell

Den slutgiltiga modellen som framställdes och användes för testkörning i vindtunneln var överlag lyckad. Den kunde köra i de hastigheter som krävdes för testerna utan att varken gå sönder eller överhettas. Bladen plasticerades inte vilket följer de beräknade värden som utförts, kugghjulen höll också under hela körningen. Det är möjligt att se slitage på kugghjulen vid närmare undersökning i efterhand. Detta sker mest på tänderna eftersom de tar upp all kraft vid låsningen och då de justerar bladvinkeln mellan tester. Resultatet är inte oväntat och följer de förväntningar som existerade på svaga punkter, men det är också en nödvändighet för att skapa de funktioner som behövs för att ändra bladvinkeln. Detta leder in på en av de kommande förbättringsförslagen, vilket är att göra dessa i ett styvare material med förbättrad livslängd under experimentell drift.

De rörliga komponenter som implementerats fungerar också som förväntat och gav de möjligheter som söktes. Det går att styra vinkeln på bladen genom att rotera noskonen och det går att ställa 360°. Problemet kom med att upprätthålla tillräckligt hög precision på gradinställningarna då de ställdes in med en separat mall som fördes över noskonen vid justeringar. Då dessa inställningar endast kunde utföras tämligen noggrant till 15° intervall och mellan dessa utfördes det med endast ögonmått så minskar precisionen på de givna resultaten. Detta diskuteras som en vidareutveckling senare i detta kapitel. Det är också möjligt att trycket som måste ges på noskonen för att hålla kontakten med de andra kugghjulen inte kunde hållas konstant under justering i vindtunneln. Detta leder till att blad potentiellt kan kuggas ur och då missa en rotation, bladet i fråga hamnar ur takt och följande resultat blir försämrade. En lösning på detta skulle vara att gå tillbaka till en genomgående skruv i mitten av navet som håller fast ett centralt kugghjul. Det skulle då kunna låsas hårt utan att riskera att plast spricker från punktlast som det gör i nuvarande modells lösning för noskonen. Det går också att lossa centralskruven utan att tappa all

kontakt mellan centralkugghjulet och de mindre kugghjulen då man gör justeringar av bladvinkel mellan tester.

Alla komponenter tillverkade i metall fungerade efter förväntan och utförde de funktioner de var tillverkade för väl. Alla gänginsatser och dess limfogar höll för de krafter som verkade på dem under körning och inga problem uppstod. Det uppkom heller inga problem med skruvar som skruvades ut på grund av vibrationer eller andra störningar. Detta är enligt förväntan då metaller i detta syfte har en högre användbarhet i många situationer än plaster, men med nackdelen av att de är dyrare och tar längre tid att tillverka unika komponenter av.

5.1.4 Vindtunneltester

De slutsatser som kunde dras från det inledande testet var att modellen i stort fungerade enligt förväntningarna och inte krävde några omfattande modifieringar. Inför kommande tester identifierades dock ett behov av ett mer precist system för att justera bladvinklarna. Vidare kommer modellen att behöva utsättas för mer krävande driftförhållanden, inklusive högre rotationshastigheter, för att möjliggöra en djupare analys samt en mer tillförlitlig jämförelse med tidigare studier och litteratur.

Det andra testet inleddes med syftet att identifiera optimala parametrar för effektutvinning, för att sedan kunna analysera dessa djupare. Av den anledningen testades effekten för olika bladvinklar, enligt figur 4.6. Då effekten gick ned vid hoppet mellan 60° och 75° , och 45° gav högre effekt än 75° , testades även $52,5^\circ$. Högre upplösning i bladvinkel än så bedömdes inte möjlig med nuvarande modell då den separata mallen inte kunde utrustas med tillräckligt noggranna vinkelmarkeringar.

När optimal vinkel väl funnits varierades resistansen för att finna vart effekten maximerades. Eftersom en högre resistans innebär lägre elektriskt motstånd, kunde motorn rotera friare, vilket resulterade i en ökning av RPM. Både rotationshastigheten och resistansen påverkar den genererade effekten. Figur 4.5 visar att högre resistans tenderar att ge något högre effekt vid en given vindhastighet. Denna ökning sker dock på bekostnad av högre rotationshastighet, vilket resulterar i ökad strukturell belastning på modellen, en faktor som måste beaktas vid val av driftparametrar.

Figur 4.8 visar att värdena på framdrivningsförhållandet är höga jämfört med traditionella vindkraftverk, men överensstämmer med förväntningarna för en småskalig, lågbelastad modell med lågt blockeringsförhållande. Det höga värdet på framdrivningsförhållandet tyder på att rotorn arbetade vid låga angreppsvinklar, vilket är i linje med den låga observerade effektkoefficienten C_p . Resultaten indikerar att modellen har låg energiupptagning men hög respons i varvtal, vilket gör den väl lämpad för studier av aerodynamiska egenskaper snarare än maximal energiutvinning.

Resultaten av testerna med den simulerade begränsande effekten, visade på att de uppmätta värdena i figur 4.9 liknade referensdatan i figur 3.2 men vissa skillnader upptäcktes. Effektgrafens stora drag identisk när det kommer till form, det som skilde de båda åt

var C_p -graf. Skillnaden mellan de två datamängderna är att den uppmätta C_p -graf inte planar ut innan den börjar avta. Detta beror på att med den valda begränsningen så når inte modellen sin maximala verkningsgrad och kurvan bryts tidigt. Fler tester med olika simulerade maxtak hade behövt utföras för att få bättre resultat. För att hitta en tillräckligt hög vindhastighet som skulle resultera i en utplaning av verkningsgraden kan datan från figur 4.10 studeras. Från figur 4.10 stabiliseras verkningsgraden runt 13-15 m/s, vilket är betydligt större än 8,5 m/s som testerna har utgått ifrån. Avvägningen kan dock motiveras med hänsyn till de begränsningar som modellen och vindtunneln medförde.

I det fallet att en utgångshastighet skulle bestämmas till 13-15 m/s med samma storlek på vinkeländring, så skulle modellen kräva en betydligt högre vindhastighet än vad som var tillgängligt under testerna i vindtunneln. Detta skulle innebära att modellen inte kan nå den satta effektgränsen vid de mindre effektiva bladvinklarna med den tillgängliga vindkraften. En lösning på detta skulle kunna vara att minska stegen för vinkeländringen och därigenom möjliggöra att effekten närmar sig det satta takvärdet. Detta var dock inte genomförbart med den färdigställda modellen eftersom vinkelinställningen inte var tillräckligt precis för att kunna tillgodose den precision som skulle krävas.

De uppmätta horisontella krafterna användes för att beräkna dragkraftskoefficienten C_T , som uppgick till cirka 0,12. Detta värde avviker, i likhet med C_p -värdena, från det tidigare teoretiskt beräknade värdet på 0,89. Den stora avvikelserna bedöms till stor del bero på att beräkningarna inte tog hänsyn till modellens skala. För en mer rättvis jämförelse hade turbinen behövt köras vid avsevärt högre varvtal, vilket inte var praktiskt genomförbart. Även bladvinkeln och precisionen i bladens geometri har sannolikt påverkat resultatet. Att både C_p och C_T avviker från teoretiska värden är förväntat vid testning av en nedskalad modell.

5.1.5 Felkällor

Mätfel kan uppstå på grund av begränsningar i instrumentens noggrannhet eller avläsningsfel. Små variationer i sensorer eller datainsamling kan påverka resultaten, särskilt vid låga vindhastigheter där små fel får större relativ inverkan.

Om rotorbladens vinkel inte är korrekt inställd kan det påverka både kraftupptag och rotation. En snedställning leder till asymmetrisk belastning, vilket påverkar mätresultaten för både effekt och aerodynamiska krafter.

Vid jämförelse med CFD-modeller kan tunnelväggarnas närhet påverka flödet mer än vad simuleringen förutsätter. Detta leder till skillnader mellan simulering och experimentella data, särskilt om vägginducerade störningar inte följer förväntningarna.

Små skillnader i 3D-utskrivna delar, t.ex. ytjämnhet eller formavvikelser, kan påverka aerodynamiken. Detta kan ge upphov till variationer i mätningar även om experimentuppställningen är oförändrad.

5.2 Förbättringsförslag

Den framtagna modellen registrerar i nuläget sin data från generatoren, samt mäter krafter som verkar på tornets bottenplatta. För att bredda analysmöjligheterna och få en mer heltäckande bild av modellens beteende under drift vore en potentiell vidareutveckling att införa ytterligare mätinstrument. Under testerna observerades ett konstant mycket lägre kraftuttag än förväntat vilket indikerar att betydande förluster sker i kraftöverföringssystemet mellan rotor och effektuttag. Ett naturligt nästa steg vore att instrumentera modellen med en momentgivare och köra vid stabil rotorhastighet för att mäta effektuttaget innan kraftöverföringen. Ett annat exempel skulle kunna vara sensorer som registrerar krafter och deformationer i rotorbladen vilka kan ge insikt i hur bladen påverkas av varierande vindförhållanden, vilket är avgörande för både hållfasthetsberäkningar och effektiv drift. Att dessutom mäta vibrationer under körning kan bidra till att identifiera potentiella problem i ett tidigt skede, såsom obalanser eller strukturella resonanser.

I nuläget används en separat mall för att ställa in rotorbladens vinkel. Denna mall skjuts in framifrån och har markeringar i 15°-intervall, vilket möjliggör en visuell avstämning mot en inskjutning i bladen som markerar nollvinkeln. Denna metod fungerar som en enkel och praktisk lösning för grundinställning, men har vissa begränsningar i precision. I framtida modeller finns därför potential att utveckla en mer exakt och integrerad lösning. Exempelvis skulle en vinkelvisare inbyggd i modellen kunna möjliggöra finare inställningar med högre noggrannhet. Detta skulle inte bara förbättra mätnoggrannheten, utan även förenkla justering under testkörningar och bidra till en mer pålitlig analys av hur bladvinkeln påverkar modellens prestanda.

I den nuvarande modellen är noskonen och kugghjulen tillverkade i hårdplast, vilket är ett relativt bra material med fördelen att det möjliggör snabb tillverkning av flera iterationer. Dock finns vissa begränsningar vad gäller precision och hållbarhet. Plasten riskerar att krympa vid utskrift och stödstrukturer kan skapa små obalanser, även om detta inte nödvändigtvis påverkar resultaten, är det en aspekt som kan förbättras. En annan risk är sprickbildning vid punktlaster, som exempelvis vid låsning med skruvar i noskonen, något som delvis löstes genom ökad vägg tjocklek. För långvarig användning, särskilt i utbildningssammanhang där modellen slits över tid, skulle ett mer slitstarkt material kunna vara motiverat. Exempelvis aluminium eller annan metall minskar risken för slitage, även om den ökade vikten kan leda till oönskade effekter som vibrationer. Detta innebär en avvägning mellan hållbarhet och dynamisk påverkan som kan vara värdefull att utforska i framtida versioner.

Den framtagna modellen har till viss del utformats med estetisk hänsyn, men fokus har i första hand legat på att uppnå en fungerande och robust konstruktion, där funktionalitet har prioriterats. Detta har lett till vissa lösningar som visserligen är praktiska men mindre tilltalande ur ett visuellt perspektiv, exempelvis användningen av slangklämma för att fästa motorhuset på tornet och tejp för att hålla motorhuslocket på plats. Även de synliga hålen i navet påverkar modellens helhetsintryck negativt och kan i vissa fall även störa luftflödet eller skapa asymmetri i belastningen. För framtida versioner skulle det därför vara en klar förbättring att arbeta mot en mer estetiskt genomarbetad design, exempel-

vis genom att täcka öppningar, ersätta provisoriska fästnanordningar med mer integrerade lösningar samt måla modellen i en enhetlig färg.

Eftersom både en optimal körhastighet och en egenfrekvens för tornet existerar, är det avgörande att dessa inte sammanfaller. Om körhastigheten ligger nära tornets egenfrekvens riskerar modellen att drabbas av resonans, vilket skulle leda till kraftiga och oönskade vibrationer under drift. För att undvika detta beräknas egenfrekvensen och placeras utanför det operativa hastighetsintervallet. Detta kan uppnås genom att justera parametrar som tornets längd, materialval och totalvikt. Att redan i designfasen ta hänsyn till denna aspekt möjliggör en mer stabil och driftsäker modell, och ger även utrymme för vidare optimering vid framtida utvecklingar.

5.3 Vidare forskning och kunskapsbehov

Ett möjligt vidarearbete är att undersöka stallbeteende och dess påverkan på vibrationer i vindkraftverk. Området innefattar hur luftflödet över bladen förändras vid höga anfallsinklar och hur detta kan leda till instabila krafter och ökad belastning på konstruktionen. För att arbeta med detta krävs grundläggande kunskap i aerodynamik, samt förståelse för vibrationsmätning och dynamisk analys.

Ett annat område att fördjupa sig i är resonansfenomen som kan uppstå vid vissa kombinationer av bladvinkel och rotationshastighet. Här är fokus på att förstå samspelet mellan kraftverkets rörelse och dess strukturella egenskaper, samt hur resonans kan påverka modellens stabilitet och livslängd. Arbetet kräver kunskap inom mekanik, vibrationsanalys och materialegenskaper.

Modellen har, tack vare sin modulära design, visat sig lämplig för pedagogisk vidareutveckling. Tack vare detta kan ytterligare ett område för vidare forskning vara att jämföra olika bladprofiler och kraftverksdesigner under likvärdiga testförhållanden. Syftet kan vara att analysera hur olika geometrier påverkar prestanda, stabilitet och energieffektivitet. Denna typ av arbete kombinerar praktisk konstruktion och testning med teoretisk förståelse inom aerodynamik och flödesmekanik. Även påverkan vid justering av tornets höjd samt olika regleringsmetoder hade kunnat studeras.

Dessa områden kan inte bara bidra till bättre design av småskaliga vindkraftverk, utan även till förbättrad förståelse för skalningsprinciper, mätosäkerhet och verkningsgrad i utbildnings- och forskningssammanhang.

5.4 Slutsats

Projektet har resulterat i en fungerande prototyp av ett horisontellt vindkraftverk, särskilt utformad för användning i Chalmers vindtunnel. Modellen uppfyller de centrala målsättningarna vad gäller hållfasthet, justerbarhet och mätbar prestanda. Den utvecklade konstruktionen möjliggör insamling av experimentell data för varvtal, vridmoment och effekt, vilket ligger i linje med projektets ursprungliga syfte.

Testerna visade att den genererade effekten varierar i huvudsak enligt förväntan och överensstämmer med etablerade effekt–vindhastighetskurvor. Högst effektuttag uppnåddes vid en bladvinkel på 60° och en elektrisk resistans på $26,3 \Omega$, inom ramen för de testade konfigurationerna. Den valda motorn visade sig lämplig för drift under realistiska förhållanden, och konstruktionen för bladvinkeljustering fungerade tillfredsställande i praktiken.

Utöver den praktiska konstruktionen har projektet även inkluderat hållfasthetsberäkningar, motorkalibrering och flödessimuleringar. Resultaten bekräftar att prototypen är strukturellt stabil, aerodynamiskt funktionell och anpassad för vindtunnelmiljö, samtidigt som förbättringspotential har identifierats, särskilt gällande vinkelinställning, materialspecifikation och instrumentering.

Prototypen utgör därmed en värdefull plattform för framtida experiment inom både undervisning och forskning. Den möjliggör inte bara studier av aerodynamisk prestanda, utan har även potential att vidareutvecklas för undersökningar av exempelvis alternativa bladprofiler, resonansbeteende eller skalningsprinciper. Därmed har projektet inte bara besvarat sin frågeställning, utan även lagt en solid grund för fortsatt kunskapsuppbyggnad inom småskalig vindkraftteknik.

Litteraturförteckning

- Agbormbai, J. & Zhu, W. (2020). Experimental study of the performance of a novel vertical-axis wind turbine. *Applied Sciences*, 10(8). Hämtad från <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85085068166&doi=10.3390%2fAPP10082902&partnerID=40&md5=4bf73179d6c56493131eee661875cf3d> (Hämtad: 2025-03-19) doi: 10.3390/APP10082902
- Alternative Energy Tutorials. (2025). *Wind turbine blade design*. Hämtad från <https://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/wind-turbine-blade-design.html> (Hämtad: 2025-02-13)
- Anycubic. (2025). *Anycubic high speed resin 2.0*. Hämtad från <https://store.anycubic.com/products/high-speed-resin-2?variant=44603424800930> (Hämtad: 2025-04-23)
- Britannica ImageQuest, Encyclopædia Britannica. (2016). *Domestic micro wind turbine*. Hämtad från quest.eb.com/images/132_1353699 (Hämtad: 2025-04-07)
- Britannica ImageQuest, Encyclopædia Britannica. (2017). *Wind turbine*. Hämtad från http://quest.eb.com/images/132_1482671 (Hämtad: 2025-03-17)
- Buhl, M. L., Jr. (2005). *A new empirical relationship between thrust coefficient and induction factor for the turbulent windmill state* (forskningsrapport nr. NREL/TP-500-36834). National Renewable Energy Laboratory (NREL). Hämtad från <https://docs.nrel.gov/docs/fy05osti/36834.pdf> (Hämtad: 2025-05-13)
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. & Bossanyi, E. (2001). *Wind energy handbook*. JOHN WILEY & SONS, LTD. Hämtad från https://library.uniteddiversity.coop/Energy/Wind/Wind_Energy_Handbook.pdf (ISBN: 0-471-48997-2, Hämtad: 2025-03-19)
- Eftekhari, H. (2022). Aerodynamic performance of vertical and horizontal axis wind turbines: A comparison review. *Indonesian Journal of Science & Technology*, 7(1), 65-88. Hämtad från <http://ejournal.upi.edu/index.php/ijost/> (Hämtad: 2025-02-13)
- Energimyndigheten. (2024). *Myndighetsgemensam uppföljning av samhällets elektrifiering*. Hämtad från <https://energimyndigheten.a-w2m.se/System/TemplateView.aspx?p=>

- Arkitektkopia&id=04b90e827bd84cdea37ecdfabe133f93&q=myndighetsgemensam&lstqty=1 (ISBN: 978-91-637-4473, Hämtad: 2025-02-10)
- Engineering Toolbox. (2023). *Drag coefficient*. Hämtad från https://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d_627.html (Hämtad: 2025-05-11)
- Jonkman, J. (2009). *Definition of a 5-mw reference wind turbine for offshore system development*. doi: 10.2172/947422
- Liu, X., Zhao, D. & Oo, N. L. (2023). Comparison studies on aerodynamic performances of a rotating propeller for small-size uavs. *Aerospace Science and Technology*, 133. Hämtad från <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85147195086&doi=10.1016%2fj.ast.2023.108148&partnerID=40&md5=19ec95f0581724ab1a3b574899e3055c> (Hämtad: 2025-04-20) doi: 10.1016/j.ast.2023.108148
- Lumen Learning. (2025). *Drag forces*. <https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/5-2-drag-forces/>. Hämtad från <https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/5-2-drag-forces/> (Hämtad: 2025-05-10)
- Massey, B. & Ward-Smith, J. (2005). *Mechanics of fluids* (8e utgåvan). Taylor & Francis. (ISBN:978-0748740437)
- McMaster. (2025). *Mcmaster*. Hämtad från <https://www.mcmaster.com/> (Hämtad: 2025-05-12)
- Möhren, F., Bergmann, O., Janser, F. & Braun, C. (2023). On the influence of elasticity on propeller performance: a parametric study. *CEAS Aeronautical Journal*, 14(2), 311 – 323. Hämtad från <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85150459260&doi=10.1007%2fs13272-023-00649-y&partnerID=40&md5=74fdf31ce956caa68f55884e7341e55d> (Hämtad: 2025-03-27) doi: 10.1007/s13272-023-00649-y
- National Renewable Energy Laboratory. (2020). *Nrel 5mw 126 rwt*. https://nrel.github.io/turbine-models/NREL_5MW_126_RWT.html. (Hämtad: 2025-05-08)
- National Renewable Energy Laboratory. (2023). *Nrel 5 mw - blade airfoils data files ar17*. Hämtad från <https://forums.nrel.gov/t/nrel-5-mw-blade-airfoils-data-files-ar17/5561> (Hämtad: 2025-05-12)
- Ny Teknik. (2025). *Här är orsakerna bakom 200 danska vindkraftshaverier*. Hämtad från <https://www.nyteknik.se/energi/har-ar-orsakerna-bakom-200-danska-vindkraftshaverier/4321792> (Hämtad: 2025-02-11)
- Orcina. (2023). *Drag and lift coefficients for various shapes*. Hämtad från <https://www.orcina.com/webhelp/OrcaFlex/Content/html/Linetypes%2CDragliftdata.htm> (Hämtad: 2025-05-10)

- Peakpx. (2017). *Captured image of a blue sky*. Hämtad från <https://www.peakpx.com/537332/captured-image-of-a-blue-sky> (Hämtad: 2025-05-13)
- Prototal AB. (2025). *Sla - stereolitografi*. Hämtad från <https://prototal.se/technology-services/3d-printing/sla/> (Hämtad: 2025-05-27)
- Red. Sundström, B. (2023). *Handbok och formelsamling i hållfasthetslära*. Institutionen för hållfasthetslära, KTH (Kungliga Tekniska Högskolan). (Kapitel 3)
- Statistiska Centralbyrån. (2023). *Eltillförsel i sverige efter produktionslag. År 1986 - 2023*. Hämtad från https://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START__EN__EN0105__EN0105A/E1ProdAr/ (Hämtad: 2025-02-13)
- Tavares, J. & Patrício, P. (2020). Maximum thermodynamic power coefficient of a wind turbine. *Wind Energy*, 23(4), 1077 – 1084. Hämtad från <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85078319844&doi=10.1002%2fwe.2474&partnerID=40&md5=c8bc3ecf21405fc96f0bc620bae29720> (Hämtad: 2025-03-26) doi: 10.1002/we.2474
- Thunder Said Energy. (2023). *Wind power: Impacts of larger turbines*. Hämtad från <https://thundersaidenergy.com/downloads/wind-power-impacts-of-larger-turbines/> (Hämtad: 2025-05-13)
- Vardaxis, N. (2021). *Single degree of freedom*. Hämtad från https://www.akustik.lth.se/fileadmin/tekniskakustik/education/2021_VTAF01/NV2_SDOF_25Mar2021_VTAF01.pdf (Hämtad: 2025-03-27)
- Wagner, H.-J. & Mathur, J. (2013). *Introduction to wind energy systems: Basics, technology and operation*. Springer. Hämtad från <https://doi.org/10.1007/978-3-642-32976-0> (Hämtad: 2025-03-28) doi: 10.1007/978-3-642-32976-0

A

Motorkalibrering

Tabell A.1: Motorkalibrering för olika elektriska belastningar.

Matserie	T RPM	Vridmom V	Vridmom Nm	Omega	P_in(mekanisk), W	Res, resistorer	Res, uppmätt	V_ut	P_ut	P_nyttig	Verkningsgrad
1	120	0.003	0.006	12.56637061	0.07539822369	26,55	7,2	0,95	0.03399246704	0.03399246704	0.4508390965
2	240	0.004	0.008	25.13274123	0.2010619298	26,55	7,2	1,9	0.5013888889	0.1359698682	0.6762586447
3	480	0.008	0.016	50.26548246	0.8042477193	26,55	7,2	3,8	2.005555556	0.5438794727	0.6762586447
4	960	0.016	0.032	100.5309649	3.216990877	26,55	7,2	7,7	8.234722222	2.233145009	0.6941720056
5	1920	0.031	0.062	201.0619298	12.46583965	26,55	7,2	15,3	32.5125	8.816949153	0.707288831
6	3000	0.048	0.096	314.1592654	30.15928947	26,55	7,2	23,75	78.34201389	21.2452919	0.7044360883
7	120	0.0033	0.0066	12.56637061	0.08293804605	12	5,5	0,7	0.08909090909	0.04083333333	0.4923353669
8	240	0.0065	0.013	25.13274123	0.326725636	12	5,5	1,45	0.3822727273	0.1752083333	0.5362552369
9	480	0.013	0.026	50.26548246	1.306902544	12	5,5	2,9	1.529090909	0.7008333333	0.5362552369
10	960	0.026	0.052	100.5309649	5.227610176	12	5,5	5,8	6.116363636	2.803333333	0.5362552369
11	1920	0.051	0.102	201.0619298	20.50831684	12	5,5	11,4	23.62909091	10.83	0.5280784417
12	3000	0.077	0.154	314.1592654	48.38052687	12	5,5	17,4	55.04727273	25.23	0.521490807
13	120	0.005	0.01	12.56637061	0.1256637061	4,5	3,1	0,4	0.05161290323	0.03555555556	0.2829421211
14	240	0.01	0.02	25.13274123	0.5026548246	4,5	3,1	0,8	0.2064516129	0.1422222222	0.2829421211
15	480	0.02	0.04	50.26548246	2.010619298	4,5	3,1	1,6	0.8258064516	0.5688888889	0.2829421211
16	960	0.04	0.08	100.5309649	8.042477193	4,5	3,1	3,2	3.303225806	2.275555556	0.2829421211
17	1920	0.076	0.152	201.0619298	30.56141333	4,5	3,1	6	11.61290323	8	0.2617679985
18	3000	0.105	0.21	314.1592654	65.97344573	4,5	3,1	8,4	22.76129032	15.68	0.2376713817
19	120	0.005	0.01	12.56637061	0.1256637061	2,4	2	0,2	0.02	0.01666666667	0.1326291192
20	240	0.01	0.02	25.13274123	0.5026548246	2,4	2	0,42	0.0882	0.0735	0.146223604
21	480	0.02	0.04	50.26548246	2.010619298	2,4	2	0,86	0.3698	0.3081666667	0.1532695259
22	960	0.039	0.078	100.5309649	7.841415263	2,4	2	1,67	1.39445	1.162041667	0.1481928488
23	1920	0.076	0.152	201.0619298	30.56141333	2,4	2	3,2	5.12	4.266666667	0.1396095992
24	3000	0.11	0.22	314.1592654	69.11503838	2,4	2	4,6	10.58	8.816666667	0.1275650983

B

Vindtunneldata

Tabell B.1: Vindtunnelresultat för bladvinkel 0° , resistans 10Ω .

Test nr	Bladvinkel	Vindhastighet [m/s]	Spänning [V]	Frekvens [Hz]	Resistans [Ohm]	Effekt [W]	RPM	Cp
1	0	3	0	0	10	0	0	0
2	0	6	0	0	10	0	0	0
3	0	9	0,1	0,3	10	0,001	18	0,000011685340
4	0	11,4	0,17	0,5	10	0,00289	30	0,000016616983
5	0	13	0,2	0,65	10	0,004	39	0,000015509536
6	0	15	0,26	0,8	10	0,00676	48	0,000017062466

Tabell B.2: Vindtunnelresultat för bladvinkel 15° , resistans 10Ω .

Test nr	Bladvinkel	Vindhastighet [m/s]	Spänning [V]	Frekvens [Hz]	Resistans [Ohm]	Effekt [W]	RPM	Cp
1	15	3	0	0	10	0	0	0
2	15	6	0,25	0,8	10	0,00625	48	0,000246487649
3	15	9	0,48	1,5	10	0,02304	90	0,000269230243
4	15	11,4	0,66	2,1	10	0,04356	126	0,000250462213
5	15	13	0,77	2,44	10	0,05929	146,4	0,000229890111
6	15	15	0,92	2,9	10	0,08464	174	0,000213634198

Tabell B.3: Vindtunnelresultat för bladvinkel 30° , resistans 10Ω .

Test nr	Bladvinkel	Vindhastighet [m/s]	Spänning [V]	Frekvens [Hz]	Resistans [Ohm]	Effekt [W]	RPM	Cp
1	30	3	0,1	0,3	10	0,001	18	0,000315504191
2	30	6	0,61	1,9	10	0,03721	114	0,001467488871
3	30	9	1,11	3,45	10	0,12321	207	0,001439750794
4	30	11,4	1,51	4,71	10	0,22801	282,6	0,001311016743
5	30	13	1,78	5,51	10	0,31684	330,6	0,001228510422
6	30	15	2,12	6,54	10	0,44944	392,4	0,001134401631

Tabell B.4: Vindtunnelresultat för bladvinkel 45° , resistans 10Ω .

Test nr	Bladvinkel	Vindhastighet [m/s]	Spänning [V]	Frekvens [Hz]	Resistans [Ohm]	Effekt [W]	RPM	Cp
1	45	3	0,14	0,44	10	0,00196	26,4	0,000618388215
2	45	6	0,86	2,7	10	0,07396	162	0,00291683625
3	45	9	1,77	5,5	10	0,31329	330	0,003660900302
4	45	11,4	2,5	7,9	10	0,625	474	0,003593638275
5	45	13	3,1	9,5	10	0,961	570	0,003726166252
6	45	15	3,8	11,6	10	1,444	696	0,00364470442

B. Vindtunneldata

Tabell B.5: Vindtunnelresultat för bladvinkel 60°, resistans 5 Ω.

Test nr	Bladvinkel	Vindhastighet [m/s]	Spänning [V]	Frekvens [Hz]	Resistans [Ohm]	Effekt [W]	RPM	Cp
1	60	3	0,03	0,14	5	0,00018	8,4	0,00005679075447
2	60	6	0,42	2	5	0,03528	120	0,001391373484
3	60	9	1,1	5	5	0,242	300	0,002827852383
4	60	11,4	1,77	8,2	5	0,62658	492	0,003602722997
5	60	13	2,27	10,5	5	1,03058	630	0,003995954647
6	60	15	3	13,7	5	1,8	822	0,004543260357

Tabell B.6: Vindtunnelresultat för bladvinkel 60°, resistans 10 Ω.

Test nr	Bladvinkel	Vindhastighet [m/s]	Spänning [V]	Frekvens [Hz]	Resistans [Ohm]	Effekt [W]	RPM	Cp
1	60	3	0	0	10	0	0	0
2	60	6	0,83	2,5	10	0,06889	150	0,002716885469
3	60	9	2,1	6,4	10	0,441	384	0,005153235127
4	60	11,4	3,2	10	10	1,024	600	0,005887816957
5	60	13	4,2	12,7	10	1,764	762	0,006839705795
6	60	15	5,5	16,7	10	3,025	1002	0,007635201434

Tabell B.7: Vindtunnelresultat för bladvinkel 52.5°, resistans 10 Ω.

Test nr	Bladvinkel	Vindhastighet [m/s]	Spänning [V]	Frekvens [Hz]	Resistans [Ohm]	Effekt [W]	RPM	Cp
1	52,5	3	0,1	0,3	10	0,001	18	0,000315504191
2	52,5	6	0,9	2,85	10	0,081	171	0,003194479939
3	52,5	9	2	6,4	10	0,4	384	0,00467413617
4	52,5	11,4	3,1	9,5	10	0,961	570	0,005525578219
5	52,5	13	3,84	11,8	10	1,47456	708	0,005717435701
6	52,5	15	4,8	14,8	10	2,304	888	0,005815373257

Tabell B.8: Vindtunnelresultat för bladvinkel 60°, resistans 15 Ω.

Test nr	Bladvinkel	Vindhastighet [m/s]	Spänning [V]	Frekvens [Hz]	Resistans [Ohm]	Effekt [W]	RPM	Cp
1	60	3	0,08	0,23	15	0,000426666667	13,8	0,000134615121
2	60	6	1,2	3,2	15	0,096	192	0,003786050298
3	60	9	3	7,7	15	0,6	462	0,007011204255
4	60	11,4	4,6	11,8	15	1,410666667	708	0,008111081173
5	60	13	5,9	15	15	2,320666667	900	0,008998116354
6	60	15	7,65	19,5	15	3,9015	1170	0,009847516824
7	60	16	8,47	21,5	15	4,782726667	1290	0,009946825774
8	60	17	9,27	24	15	5,72886	1440	0,009933226591
9	60	18	10,2	26	15	6,936	1560	0,01013119015
10	60	19	11,2	28,7	15	8,362666667	1722	0,01038610911
11	60	20	12	30,8	15	9,6	1848	0,0102223358

Tabell B.9: Vindtunnelresultat för bladvinkel 60°, resistans 15 Ω, med tornet vridet 45°.

Test nr	Bladvinkel	Vindhastighet [m/s]	Spänning [V]	Frekvens [Hz]	Resistans [Ohm]	Effekt [W]	RPM
1	60	3	0	0	15	0	0
2	60	6	0,72	1,9	15	0,03456	114
3	60	9	1,65	4,3	15	0,1815	258
4	60	11,4	2,5	6,5	15	0,416666667	390
5	60	13	3,1	8,1	15	0,640666667	486
6	60	15	3,93	10,2	15	1,02966	612

Tabell B.10: Vindtunnelresultat för bladvinkel 60°, resistans 26 Ω.

Test nr	Bladvinkel	Vindhastighet [m/s]	Spänning [V]	Frekvens [Hz]	Resistans [Ohm]	Effekt [W]	RPM	Cp	Advance ratio
1	60	3	0	0	26,3	0	0	0	#DIV/0!
2	60	6	2	4,4	26,3	0,1520912548	264	0,005998178544	3,03030303
3	60	9	4,6	10	26,3	0,8045627376	600	0,009401589483	2
4	60	11,4	6,9	14,9	26,3	1,81026616	894	0,01040870683	1,700223714
5	60	12	7,5	16,1	26,3	2,13878327	966	0,01054367322	1,6563147
6	60	13	8,5	18,2	26,3	2,747148289	1092	0,01065174947	1,587301587
7	60	15	10,5	22,5	26,3	4,192015209	1350	0,01058078695	1,481481481
8	60	16	11,53	24,5	26,3	5,054787072	1470	0,01051264056	1,451247166
9	60	17	12,55	26,6	26,3	5,988688213	1596	0,01038374075	1,42021721
10	60	18	13,5	28,7	26,3	6,929657795	1722	0,01012192629	1,393728223
11	60	19	14,45	30,8	26,3	7,939258555	1848	0,00986025286	1,370851371
12	60	20	15,4	33	26,3	9,017490494	1980	0,00960206416	1,346801347

Tabell B.11: Vindtunnelresultat för bladvinkel 75°, resistans 10 Ω.

Test nr	Bladvinkel	Vindhastighet [m/s]	Spänning [V]	Frekvens [Hz]	Resistans [Ohm]	Effekt [W]	RPM	Cp
1	75	3	0	0	10	0	0	0
2	75	6	0,28	0,88	10	0,00784	52,8	0,000309194107
3	75	9	0,9	2,8	10	0,081	168	0,000946512574
4	75	11,4	1,6	5	10	0,256	300	0,001471954239
5	75	13	2,2	6,9	10	0,484	414	0,001876653971
6	75	15	3,1	9,4	10	0,961	564	0,002425596224

Tabell B.12: Vindtunnelresultat för mätserier där målet var att uppnå och därefter behålla 500 RPM.

Test nr	Bladvinkel	Vindhastighet [m/s]	Spänning [V]	Frekvens [Hz]	Resistans [Ohm]	Effekt [W]	RPM	Cp
1	60	3	0,19	0,43	26,3	0,001372623574	25,8	0,000433068491
2	60	3,5	0,44	1	26,3	0,00736121673	60	0,001462562281
3	60	4	0,71	1,6	26,3	0,01916730038	96	0,002551231523
4	60	4,5	1	2,35	26,3	0,03802281369	141	0,003554476175
5	60	5	1,34	3	26,3	0,06827376426	180	0,004652782299
6	60	5,5	1,64	3,85	26,3	0,1022661597	231	0,005236158406
7	60	6	1,98	4,65	26,3	0,1490646388	279	0,005878814792
8	60	6,5	2,32	5,45	26,3	0,2046539924	327	0,006348177314
9	60	7	2,7	6,2	26,3	0,2771863118	372	0,00688409028
10	60	7,5	3,06	7	26,3	0,3560304183	420	0,007189061712
11	60	8	3,48	7,85	26,3	0,4604714829	471	0,007661286013
12	60	8,5	3,89	8,65	26,3	0,575365019	519	0,00798096809
13	52,5	8,8	3,81	8,3	26,3	0,5519429658	498	0,006899459724
14	45	10,8	3,92	8,5	26,3	0,5842737643	510	0,003951063563
15	37,5	11,8	3,85	8,5	26,3	0,5635931559	510	0,002922056345
16	30	15,2	3,84	8,5	26,3	0,5606692015	510	0,001360018556
17	22,5	21,8	3,75	8,4	26,3	0,5346958175	504	0,0004396491153
18	15	25	2,33	6,3	26,3	0,2064220532	378	0,0001125394958

B. Vindtunneldata

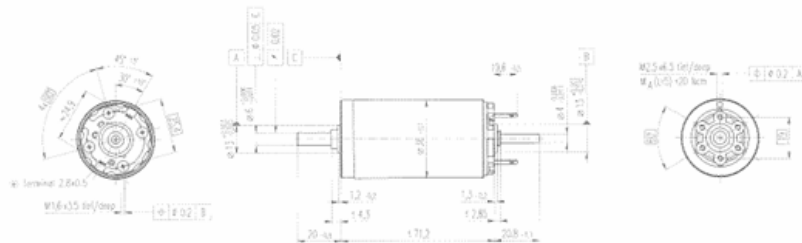
Tabell B.13: Tabell över kraft- och momentdata från sexpunktsvågen, sammanställt i ett Google Kalkylark.

Resistans (Ohm)	Bladvinkel	Frekvens (Hz)	Spänning (V)	Vindhastighet (m/s)	Kraft D (N)	Kraft S (N)	Kraft L (N)	Moment m (Nm)	Moment n (Nm)	Moment o (Nm)
10	0	0	3.052136	0.0714306705	0.0408074883	-0.00448660554	0.00396478485	-0.0315671181	-0.00253834447	
10	0	0	6.130000	0.261451334	0.0138178846	-0.0129831511	0.00112398023	-0.131827801	-0.00233999749	
10	0	0.1	9.021682	0.558752176	0.0190386837	-0.0330048263	0.00234063826	-0.277998177	-0.00335780528	
10	0	0.5	11.359773	0.901658413	0.0302138724	-0.0663173000	0.00543153863	-0.441420175	-0.00306483844	
10	0	0.65	12.950455	1.17350055	0.0388124261	-0.0743055579	0.0126135220	-0.574314307	-0.00249248445	
10	0	0.8	14.944818	1.56251480	0.0198862596	-0.0823250117	0.000596680432	-0.774889904	-0.00355267215	
10	15	0	3.045136	0.07489002814	0.0223484798	-0.023242641	0.000617483047	-0.0394002352	-0.00323769693	
10	15	0.8	6.108045	0.287015448	0.0146417792	-0.0643267782	-0.00526542767	-0.137368864	-0.00466456997	
10	15	1.5	9.034227	0.592756029	0.0154365612	-0.0718280581	-0.00630188146	-0.290989891	-0.00328109809	
10	15	2	11.382773	0.926724034	0.00424866350	-0.0761539764	-0.00421074612	-0.460868292	-0.00132710340	
10	15	2.44	12.943909	1.19312357	0.00598867231	-0.0892010737	-0.00830737886	-0.591582534	-0.00220506219	
10	15	2.9	14.925000	1.61607926	0.0127385240	-0.0940872070	-0.0135809182	-0.803283666	-0.00416296604	
10	30	0.1	3.235727	0.118640701	0.00997505067	-0.0407538041	0.00303992470	-0.0500663824	-0.00371376456	
10	30	1.9	6.098909	0.320989999	0.00610469596	-0.0627309999	-0.00400123657	-0.160651930	-0.00386646781	
10	30	3.45	9.016636	0.660736855	0.0121122825	-0.0679885616	-0.00703207555	-0.331551879	-0.00285056482	
10	30	4.71	11.376591	1.01744767	0.0108008695	-0.086501334	-0.00617564587	-0.519783796	-0.00276536337	
10	30	5.51	12.936864	1.29751659	0.017766386	-0.0905360307	-0.00863438464	-0.668527380	-0.00415828870	
10	30	6.54	14.936682	1.73766399	0.015405513	-0.0869461953	-0.00984837400	-0.892100907	-0.00252947753	
10	45	0.44	3.243273	0.116657920	-0.0249206370	-0.0737252841	0.00523047998	-0.0727113454	-0.000709286741	
10	45	2.7	6.067591	0.368998975	-0.0315287344	-0.0890351771	-0.00169792826	-0.223100314	-0.00355194116	
10	45	5.5	9.017727	0.792974592	-0.0387893650	-0.11857830	-0.0129443826	-0.457578733	-0.00147899951	
10	45	8	11.335091	1.22310016	-0.0225937856	-0.114367013	-0.0193126974	-0.700383777	-0.00186996179	
10	45	9.5	12.917000	1.57233292	-0.0325792991	-0.114407689	-0.0328421093	-0.897931669	-0.00425719394	
10	45	11.6	14.904545	2.10012331	-0.0451925463	-0.108470224	-0.0431712849	-1.1786632	-0.00151220722	
10	60	0	3.197000	0.126060487	-0.0242802926	-0.0813340600	0.00682939558	-0.0804106160	-0.00203722888	
10	60	2.5	6.099273	0.467456483	-0.0194776707	-0.0906485710	-0.00296027406	-0.286858715	-0.00182378230	
10	60	6.4	9.01364	1.0598082	-0.0288293616	-0.0969246227	-0.0193170171	-0.649779079	-0.00307822230	
10	60	10	11.331409	1.37073037	-0.0457796438	-0.118242710	-0.0412899616	-1.05006224	-0.00217588036	
10	60	12.7	12.904500	2.22906135	-0.0549373501	-0.112515050	-0.0638455251	-1.3690217	-0.00465177164	
10	60	16.7	14.872045	3.00010371	-0.0847953759	-0.123218730	-0.0887016534	-1.84509578	-0.00471922070	
10	75	0	3.232909	0.160003574	-0.0193630593	-0.0935465705	0.00622105718	-0.0845442549	-0.00249116337	
10	75	0.88	6.089909	0.495484415	-0.0193339981	-0.0830387547	0.00142680699	-0.292721270	-0.00297539710	
10	75	2.8	8.996636	1.11217552	-0.0317247409	-0.107287628	-0.00599566118	-0.677518816	-0.00155701007	
10	75	5	11.317909	1.83576415	-0.0494068991	-0.112027203	-0.0257439967	-1.13893123	-0.00150666008	
10	75	6.9	12.880000	2.47971061	-0.0527178310	-0.112864285	-0.0304371556	-1.55035799	-0.00133130243	
10	75	9.4	14.878500	3.45085606	-0.0688822340	-0.123148683	-0.0545559127	-2.16989872	-0.00355320091	
10	52.5	0.3	3.237636	0.147133856	-0.0288428533	-0.0790083160	0.00527869642	-0.0741860523	-0.00305806419	
10	52.5	2.85	6.090864	0.464533443	-0.0233866277	-0.110217202	-0.00277893243	-0.256627182	-0.00365664746	
10	52.5	6.4	9.000727	0.935577755	-0.0374696952	-0.113798599	-0.0216056357	-0.556933703	-0.00269502996	
10	52.5	9.5	11.344727	1.49309187	-0.0455720580	-0.137420617	-0.0368809028	-0.874253310	-0.00276115108	
10	52.5	11.8	12.913773	1.92155689	-0.0615918164	-0.142764520	-0.0522099197	-1.12650736	-0.00315775678	
10	52.5	14.8	14.912091	2.54688934	-0.0795908933	-0.123125915	-0.0701317387	-1.48675014	-0.000546664471	
15	60	0.23	3.236909	0.165191087	-0.0212671956	-0.0928278150	0.00586289922	-0.0789415453	-0.000710509078	
15	60	3.2	6.052000	0.505458896	-0.0329157218	-0.111190172	-0.00167246466	-0.289448532	-0.00174680485	
15	60	7.7	8.995000	1.10919751	-0.0536561163	-0.110897880	-0.0251850015	-0.660498105	-0.00236750251	
15	60	11.8	11.345545	1.75939771	-0.0738273313	-0.132103351	-0.0474865384	-1.066484805	-0.00337305156	
15	60	15	12.895364	2.30268996	-0.0758464265	-0.130416424	-0.0602574319	-1.40155650	-0.00302516294	
15	60	19.5	14.902364	3.08587352	-0.0891519717	-0.134098853	-0.0820120602	-1.87146856	-0.00258065521	
5	60	0.14	3.235364	0.194700470	-0.042765314	-0.0879682690	0.00785530877	-0.0743896243	0.0000221039067	
5	60	2	6.076091	0.531361623	-0.0590502714	-0.110735087	-0.000873672783	-0.278377041	0.000717827113	
5	60	5	8.995818	1.10954133	-0.0511613176	-0.152697582	-0.0180783660	-0.639751205	-0.000471163757	
5	60	8.2	11.342091	1.76762436	-0.0636252366	-0.153407052	-0.0392513949	-1.05051097	-0.000398829383	
5	60	10.5	12.899000	2.30741412	-0.0814753623	-0.156010371	-0.0524786153	-1.37903265	-0.000883362668	
5	60	13.7	14.901273	3.11503637	-0.0984028458	-0.157213637	-0.0855246669	-1.86317390	-0.00240541483	
15	60	0	3.239909	0.27940374	0.0760692662	-0.126940032	0.0589606499	-0.0595400337	-0.00396983413	
15	60	1.9	6.088636	0.481131166	0.273878076	-0.0890505090	0.176783389	-0.183058481	-0.00129347415	
15	60	4.3	9.028000	0.821702946	0.639132727	-0.0400784108	0.383375053	-0.386836597	0.000666933282	
15	60	6.5	11.354364	1.19858325	1.02564614	0.0311965175	0.618648581	-0.601899933	0.00163494032	
15	60	8.1	12.934909	1.50817170	1.35809079	0.103699148	0.810163444	-0.776237199	0.00372990032	
15	60	10.2	14.934773	1.95184619	1.83929699	0.201454978	1.08758552	-1.01821422	0.00643290022	
25	60	0	3.254136	0.208672722	-0.106363289	-0.131124505	0.01391167330	-0.0755554785	0.00413658464	
25	60	4.4	6.109364	0.568432467	-0.0896768445	-0.143644426	0.00260058963	-0.295840785	0.00454206680	
25	60	10	8.997909	1.15533626	-0.108431476	-0.166005446	-0.0197021206	-0.658199451	0.00415994949	
25	60	14.9	11.325818	1.78443839	-0.132844998	-0.185323688	-0.0405851345	-1.05269578	0.00492712862	
25	60	18.2	12.895864	2.29519121	-0.152984045	-0.169783334	-0.0539227400	-1.36203387	0.0036563864	
25	60	22.5	14.886364	3.02381837	-0.175254092	-0.190295136	-0.0733533184	-1.79601368	0.00497711803	
25	60	24.5	15.864091	3.42173400	-0.172471359	-0.182009590	-0.0803794967	-2.02973977	0.00451721329	
25	60	26.6	16.892727	3.84969772	-0.177314568	-0.178792561	-0.0909704789	-2.28396843	0.004072093788	
25	60	28.7	17.896545	4.29622951	-0.208743991	-0.188581023	-0.106808460	-2.54932519	0.00289502085	
25	60	30.8	18.926500	4.75616521	-0.217169670	-0.192349534	-0.114656383	-2.82912159	0.00459875963	
25	60	33	19.950227	5.29802097	-0.224653106	-0.195044131	-0.126472416	-3.12858961	0.00294769661	

C

Motordatablad

RE 36 Ø36 mm, Graphite Brushes, 70 Watt



Motor Data	Order Number													
	118797	118798	118799	118800	118801	118802	118803	118804	118805	118806	118807	118808	118809	118810
1 Assigned power rating	W	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
2 Nominal voltage	V _{0N}	18.0	24.0	32.0	42.0	42.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0
3 No load speed	rpm	6410	6210	6790	7020	6340	6420	5220	4320	3450	2830	2280	1780	1420
4 Stall torque	mNm	730	783	832	865	790	785	627	504	403	326	258	198	158
5 Speed/torque gradient	rpm/mNm	8.96	8.05	8.27	8.19	8.14	8.25	8.41	8.65	8.67	8.80	8.06	9.17	9.21
6 No load current	mA	147	105	89	70	61	55	42	33	25	20	15	12	9
7 Starting current	A	27.8	21.5	18.7	15.3	12.6	11.1	7.22	4.80	3.06	2.04	1.30	0.784	0.501
8 Terminal resistance	Ohm	0.647	1.11	1.71	2.75	3.35	4.32	6.69	10.00	15.7	23.5	38.8	61.3	95.8
9 Max. permissible speed	rpm	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200	8200
10 Max. continuous current	A	3.14	2.44	1.99	1.59	1.44	1.27	1.03	0.847	0.679	0.556	0.445	0.346	0.277
11 Max. continuous torque	mNm	82.4	88.8	88.5	89.6	90.4	90.1	89.6	89.0	89.2	88.8	88.1	87.3	87.2
12 Max. power output at nominal voltage	W	119	125	146	157	129	131	84.9	56.4	36.0	23.9	15.2	9.09	5.78
13 Max. efficiency	%	84	85	86	86	86	85	84	82	81	79	77	75	72
14 Torque constant	mNm/A	25.3	36.4	44.5	55.6	52.6	70.7	86.9	105	131	160	198	253	315
15 Speed constant	rpm/V	284	263	215	169	152	135	110	90.9	72.7	59.8	48.2	37.5	30.3
16 Mechanical time constant	ms	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
17 Rotor inertia	gcm ²	62.0	67.7	65.2	65.4	65.6	64.6	63.3	61.5	61.3	60.3	59.2	57.8	57.5
18 Terminal inductance	mH	0.10	0.20	0.30	0.49	0.60	0.76	1.15	1.68	2.62	3.67	5.96	9.70	15.10
19 Thermal resistance housing-ambient	K/W	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4
20 Thermal resistance rotor-housing	K/W	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
21 Thermal time constant winding	s	39	43	41	41	41	41	40	39	39	38	37	36	35

Specifications

- Axial play: 0.05 - 0.15 mm
- Max. ball bearing loads:
 - axial (dynamic): 5.5 N
 - not preloaded: 2.4 N
 - radial (5 mm from flange): 28 N
 - Press-fit force (static): 110 N
 - (static, shaft supported): 1200 N
- Radial play ball bearings: 0.025 mm
- Ambient temperature range: -20/+100 °C
- Max. rotor temperature: +125 °C
- Number of commutator segments: 13
- Weight of motor: 350 g

Operating Range

Operating range graph showing speed (n [rpm]) vs torque (M [mNm] and I [A]). The graph indicates a recommended operating range for 70 Watt. The motor can operate continuously within this range. Short term operation is also possible, but the motor may be briefly overloaded (recurring).

Comments

- Recommended operating range
- Continuous operation: In observation of above listed thermal resistances (lines 19 and 20) the maximum permissible rotor temperature will be reached during continuous operation at 25 °C ambient. = Thermal limit.
- Short term operation: The motor may be briefly overloaded (recurring).
- 118805: Motor with high resistance winding
- 118797: Motor with low resistance winding

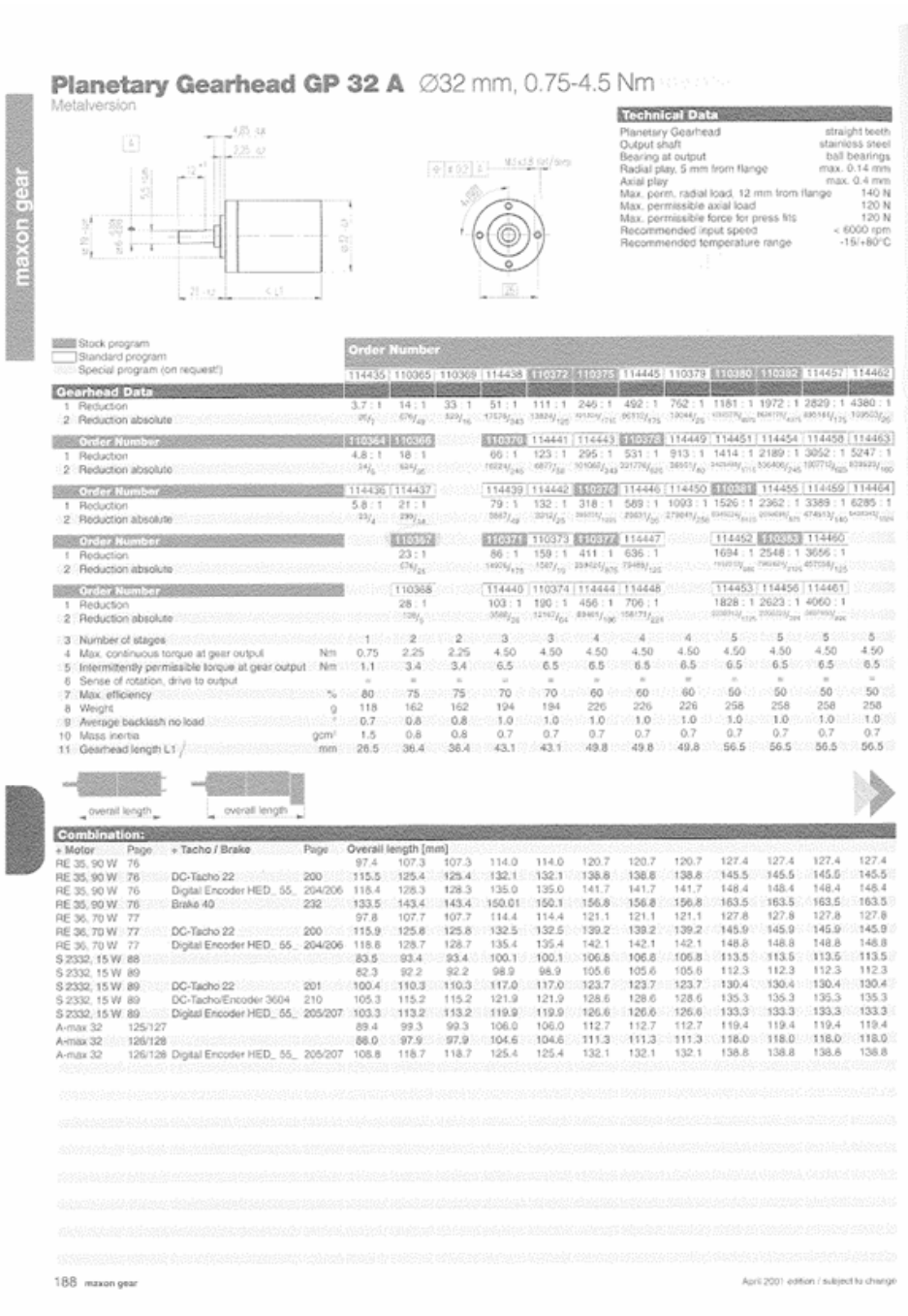
maxon Modular System

- Planetary Gearhead: Ø32 mm, 0.75-4.5 Nm, Details page 188
- Planetary Gearhead: Ø32 mm, 1.0-6.0 Nm, Details page 191
- Planetary Gearhead: Ø32 mm, 0.4-2.0 Nm, Details page 193
- Planetary Gearhead: Ø42 mm, 3-15 Nm, Details page 195
- DC-Tech: Ø22 mm, 0.52 V, Details page 200
- Digital Encoder: HP HEDS 5540, 500 CPT, 3 channels, Details page 204
- Digital Encoder: HP HEDL 5540, 500 CPT, 3 channels, Details page 206

April 2001 edition / subject to change

maxon DC motor 77

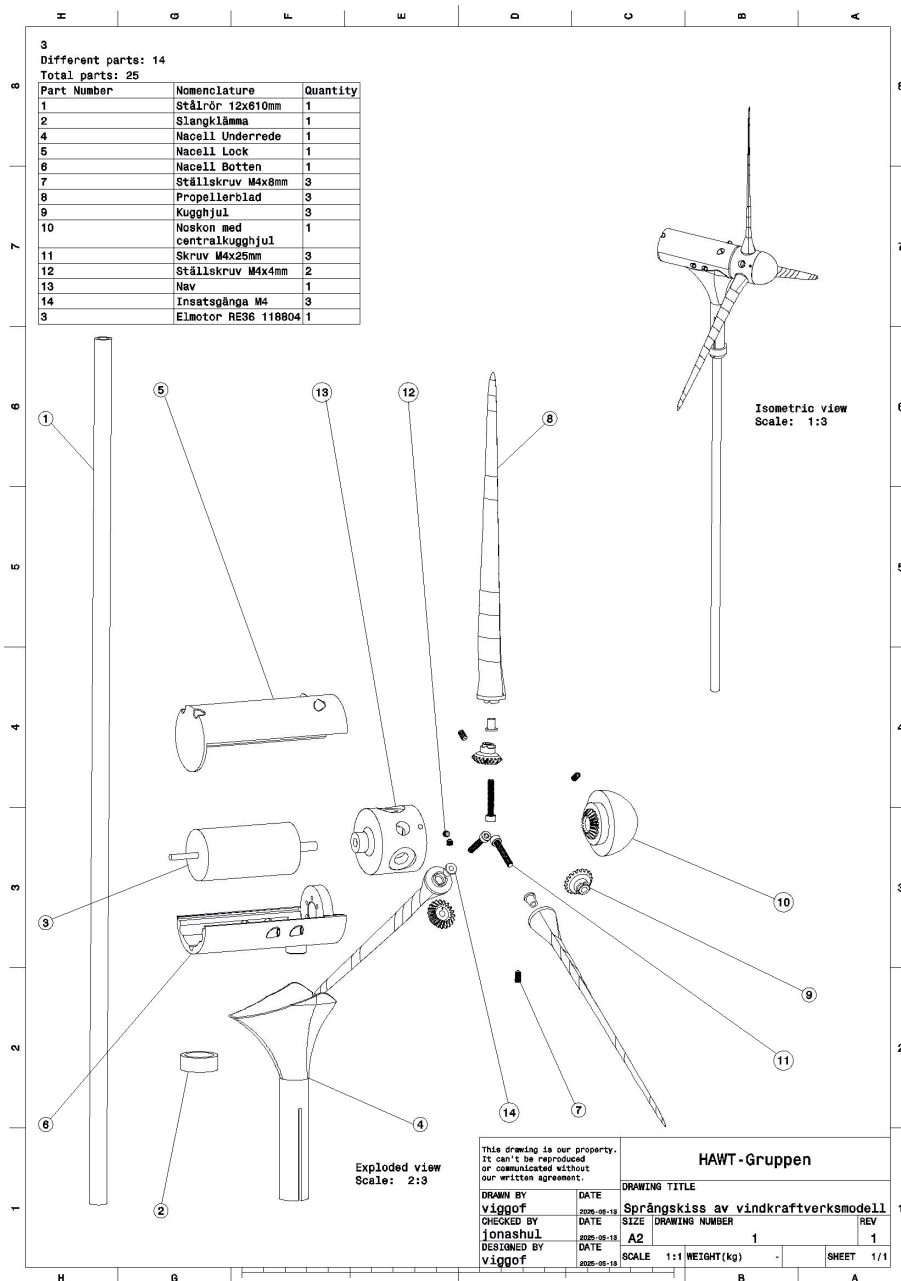
Figur C.1: Datablad över motorn som användes (specifikt modellnummer 118804).



Figur C.2: Datablad över tillgängliga växellådor till motorn.

D

Sprängskiss



Figur D.1: Sprängskiss över vindkraftverksmodellen.

**INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige 2025

www.chalmers.se



CHALMERS