



**INSTITUT FÜR  
ENERGIETECHNIK  
UND THERMODYNAMIK**

**Institute of Energy Systems and Thermodynamics**

Diplomarbeit

## **Experimentelle Betrachtung eines Maschinenstarts an einer Modellpumpturbine**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

**Dipl.-Ing. Dr.techn. Anton Maly**

E302 - Institut für Energietechnik und Thermodynamik  
Fachbereich Strömungsmaschinen

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

**Dominik Loibnegger, BSc**



Klagenfurt, am 27. August 2023

# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig angefertigt wurde. Sämtliche verwendeten Textausschnitte, Zitate oder Inhalte anderer Verfasser wurden ausdrücklich als solche gekennzeichnet. Weiter erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Klagenfurt, am 27. August 2023

.....  
(Dominik Loibnegger)

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein ganzer Dank meinem Betreuer am Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Herrn Anton Maly, für die hervorragende Unterstützung beim Erarbeiten und Verfassen dieser Diplomarbeit. Ich möchte mich zudem für das wertvolle Wissen bedanken, das ich im Laufe meines Studiums in den Lehrveranstaltungen des Forschungsbereiches Strömungsmaschinen, aber auch in allen anderen Lehrveranstaltungen der TU Wien erwerben durfte.

Weiters möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Kommilitonen David und Yves bedanken. Ihr habt mir das Studium mit eurer Unterstützung und Freundschaft so viel reicher gemacht. Ohne euch wäre es für mich nicht dasselbe gewesen.

Ohne die familiäre Unterstützung meiner Eltern hätte ich diesen Weg vermutlich nie eingeschlagen. Ihr habt mich von Anfang an in all meinen Vorhaben unterstützt und mir durch eure Großzügigkeit auch das gewünschte Studium finanziert. Ihr habt mir immer Mut gemacht, auch wenn es mal schwierig war. Dafür danke ich euch von Herzen.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Verlobten Katharina bedanken. Du hast mich nicht nur während des Schreibens dieser Arbeit, sondern auch während meines gesamten Studiums stets motiviert und unterstützt. In schwierigen Zeiten hast du mich aufgefangen, mich mental gestärkt und mir immer wieder Mut gemacht. Ich liebe dich!

# Abstract

The requirements for pumped storage power plants have changed in recent years. Due to the increasing number of volatile generators in the power grid, pumped storage power plants are increasingly being used to stabilize the grid. This leads to increased start-stop cycles and consequently to higher loads on the turbine.

Therefore, the institute for energy systems and thermodynamics (IET) at the Vienna University of Technology is more and more interested in experimental investigations and numerical simulations of the transient operating behavior of pump turbines. In order to be able to carry out these investigations at the pump turbine test rig of the institute, the implementation of a realistic and automatic start and stop procedure is necessary.

In this work, experimental considerations of a machine startup on a model pump turbine are carried out. The test rig is located at the institute for energy systems and thermodynamics at the Vienna University of Technology. The main objective is to investigate how and whether a realistic startup process can be reproduced on the test rig.

This diploma thesis is divided into three main sections. First, the behavior of the test bench in speed-no-load conditions is investigated and further measurements are carried out to determine the speed-no-load functions. The second section deals with the implementation of an automatic start-up procedure in the existing measurement and control program of the test rig. In the last section, measurements are carried out to determine the best operating parameters of the start-up program.

# Kurzfassung

Die Anforderungen an Pumpspeicherkraftwerke haben sich in den letzten Jahren geändert. Aufgrund der steigenden Anzahl an volatilen Erzeugern im Stromnetz, werden Pumpspeicherkraftwerke zunehmend zur Netzstabilisierung eingesetzt. Das führt zu vermehrten Start-Stopp Zyklen und folglich zu höheren Belastungen an der Turbine. Deshalb besteht am Institut für Energietechnik und Thermodynamik der Technischen Universität Wien vermehrtes Interesse in experimentellen Untersuchungen bzw. numerischen Simulationen über das transiente Betriebsverhalten von Pumpturbinen. Um diese Untersuchungen am Pumpturbinenprüfstand des Instituts durchführen zu können, ist die Implementierung eines realitätsnahen und automatischen Anfahr- bzw. Stoppvorgangs notwendig.

In dieser Arbeit werden experimentelle Betrachtungen eines Maschinenstarts (startup) an einer Modellpumpturbine im Turbinenbetrieb angestellt. Der Prüfstand befindet sich am Institut für Energietechnik und Thermodynamik (IET) an der Technischen Universität Wien. Es wird vor allem untersucht, wie und ob ein realitätsnaher Anfahrvorgang am Prüfstand abgebildet werden kann.

Die vorliegende Diplomarbeit gliedert sich in drei praktische Bereiche. Zunächst wird das Verhalten des Prüfstands im lastfreien Leerlauf untersucht und weiterführende Messungen zur Ermittlung der Leerlaufdrehzahlkennlinien durchgeführt. Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Implementierung eines automatischen Anfahrvorgangs in das bestehende Mess- und Steuerungsprogramm des Prüfstands. Im letzten Abschnitt erfolgen Messungen zur Ermittlung der optimalen Betriebsparameter der Anfahrautomatik.

# Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	viii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung	3
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1 Strömungsverhältnisse am Laufrad	4
2.1.1 Geschwindigkeitsdreiecke	4
2.1.2 Leerlaufverhalten bei konstanter Leitapparatöffnung	6
2.2 Definition der Leerlaufdrehzahl	10
2.3 Maschinenstart	11
<b>3 Versuchsaufbau</b>	<b>13</b>
3.1 Pumpturbinenprüfstand	13
3.1.1 Laufrad	15
3.1.2 Leitapparat	15
3.2 Instrumentierung	18
3.2.1 Druckmessung	18
3.2.2 Durchflussmessung	19
3.2.3 Drehzahlmessung	20
3.2.4 Drehmomentmessung	20
3.3 Messwerterfassung und Steuerung	21
<b>4 Leerlaufdrehzahlkennlinie</b>	<b>22</b>
4.1 Messablauf zur Leerlaufdrehzahlkennlinienerfassung	22
4.2 Messergebnisse der Leerlaufdrehzahlkennlinienerfassung	25
4.3 Erkenntnisse der Leerlaufdrehzahlkennlinienerfassung	28
<b>5 Programmierung der Anfahrautomatik</b>	<b>32</b>
5.1 Bestehendes Mess- und Steuerungsprogramm	32

5.2	Erstellung der Funktionen zu den Leerlaufdrehzahlkennlinien . . . . .	34
5.3	Essentielle Vorbetrachtungen . . . . .	38
5.4	Programmierung und Implementierung . . . . .	39
5.4.1	Informationsfluss / Programmablauf . . . . .	39
5.4.2	Grafische Benutzeroberfläche . . . . .	44
5.5	Erkenntnisse der Inbetriebnahme . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Untersuchung der Auswirkung der Programmparameter auf den Maschinenstart (Startup)</b>	<b>50</b>
6.1	Messablauf zum Maschinenstart . . . . .	50
6.2	Messergebnisse für den Maschinenstart . . . . .	52
6.2.1	Maschinenstart mit Ausgangsparameter . . . . .	52
6.2.2	Einfluss der Programmparameter auf die Fallhöhe . . . . .	53
6.2.3	Optimale Programmparameter . . . . .	55
6.3	Schlussfolgerung zum Maschinenstart . . . . .	58
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>60</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>66</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>69</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>70</b>
A.1	Leerlaufdrehzahlkennlinie . . . . .	71
A.2	Parametersets . . . . .	74
A.3	Abbildungen . . . . .	74

# Nomenklatur

## Formelzeichen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$A$	Fläche	$m^2$
$c$	Strömungsgeschwindigkeit	$m/s$
$D$	Durchmesser	$m$
$dn$	Drehzahländerung	$min^{-1}/Iteration$
$dt$	Aktualisierungsperiode	$ms$
$F$	Kraft	$N$
$g$	Fallbeschleunigung	$m/s^2$
$H$	Fallhöhe	$H$
$LA$	Leitapparatstellung	$^\circ$
$M, T$	Moment	$kgm^2/s^2$
$n$	Drehzahl	$min^{-1}$
$n_q$	spezifische Drehzahl	—
$p$	statischer Druck	$kg/ms^2$
$Q$	Volumenstrom	$m^3/s$
$t$	Zeit	$s$
$v$	Verstellgeschwindigkeit	$\%$
$\alpha$	Leitapparatwinkel	$^\circ$
$\beta$	Winkel	$rad$
$\epsilon_H$	Abbruchkriterium	$m$
$\epsilon_{LA}$	Abbruchkriterium	$^\circ$
$\phi$	Schaufelwinkel	$rad$
$\rho$	Dichte	$kg/m^3$
$\tau$	Verengungsfaktor	—

## Indizes

Symbol	Beschreibung
1	Eintritt
2	Austritt
$I$	Schranke 1
$II$	Schranke 2
<i>ber.</i>	berechnet
$D$	Druckseite
$f$	schnell
$G$	Motorgenerator
$INF$	Endlage
<i>Ist</i>	Ist-Wert
$L$	Laufgrad
$LA$	Leitapparat
<i>loop</i>	Schleifendurchgang
$LR$	Lagerreibung
$LS$	Leitschaufel
$m$	Meridiankomponente
$MW$	Mittelwert
$P$	Versorgungspumpe
$R$	Reaktionsmoment
<i>res</i>	resultierend
$S$	Saugseite
<i>Soll</i>	Soll-Wert
<i>start</i>	Startwert
<i>startup</i>	Anfahrzyklus
$T$	Turbine
$u$	Umfangskomponente
$W$	Welle

# 1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten hat Klimaschutz immer mehr an Bedeutung in Politik und Gesellschaft gewonnen. Die Europäische Kommission hat in einer Mitteilung im Jahr 2015 ihre *Rahmenstrategie für eine krisenfeste Energieunion mit einer zukunftsorientierten Klimaschutzstrategie* kommuniziert. Die EU-weite Senkung der Treibhausgasemissionen um mindestens 40 % gegenüber den Werten aus 1990, sowie die Steigerung des Anteils der verbrauchten erneuerbaren Energien auf mindestens 27 %, wurden u. a. als Ziele für das Jahr 2030 definiert[1]. Zur nationalen Umsetzung der europäischen Klimastrategie hat sich die Österreichische Bundesregierung in ihrer Klima- und Energiestrategie *#mission2030* gar zum Ziel gesetzt, den Gesamtstromverbrauch in Österreich bis 2030 zu 100 % aus erneuerbaren Energiequellen zu decken[2].

Der Erfolg dieses Vorhabens wird stark vom Ausbau von Windkraft und Photovoltaik abhängig sein. In Abbildung 1.1 ist am Beispiel Österreich, bereits seit einigen Jahren ein starker Zuwachs in der Nutzung dieser Energiequellen zu verzeichnen. Dieser Aufwärtstrend wird auch in Zukunft anhalten.

Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, wie eben Windkraft und Photovoltaik, ist stark witterungsabhängig und unterliegt natürlichen saisonalen Schwankungen. Diese Volatilität macht die Planung der Stromproduktion und die Regelung des Stromnetzes komplexer. Dadurch haben sich die Anforderungen an heutige Pumpspeicherkraftwerke (PSKW) in den letzten Jahren massiv geändert. Wurden Pumpspeicherkraftwerke früher vorwiegend zur Spitzenlastabdeckung eingesetzt, so tragen sie heutzutage wesentlich zur Netzstabilisierung bei.[4] Infolgedessen hat sich auch die Betriebsführung der Kraftwerksanlagen geändert. Vor allem ältere Francis-Turbinen sind für etwa 1-10 Start-Stopp-Zyklen pro Jahr [5] ausgelegt, wohingegen in den letzten Jahren beobachtet wurde, dass Pumpturbinen bis zu 500 mal pro Jahr [6] zur Netzstabilisierung gestartet bzw. gestoppt werden. Diese Veränderung in der Betriebsführung führen zu vermehrten Druckpulsationen, welche im Teillastbetrieb und bei transienten Vorgängen verstärkt auftreten und zu erhöhten Belastung an der Turbine führen [7]. Deshalb besteht am Institut für Energietechnik und Thermodynamik der

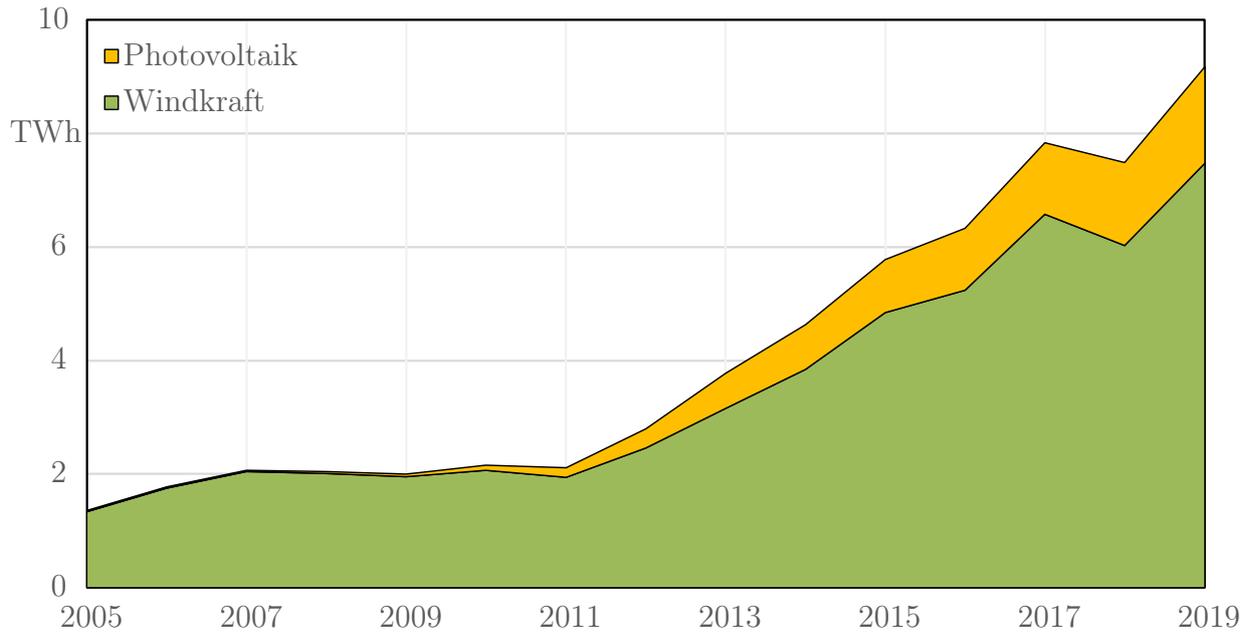


Abbildung 1.1: Inländische Erzeugung von Rohenergie aus Windkraft und Photovoltaik (eigene Grafik, Datenquelle: Statistik Austria[3])

Technischen Universität Wien vermehrt Interesse in experimentellen Untersuchungen bzw. numerischen Simulationen über das transiente Betriebsverhalten von Pumpturbinen. Um diese Untersuchungen am Pumpturbinenprüfstand des Instituts durchführen zu können, soll ein realitätsnaher Anfahr- bzw. Stoppvorgang implementiert werden.

## 1.1 Zielsetzung

Die im Rahmen dieser Arbeit zu erreichenden Ziele lassen sich in folgende drei Bereiche gliedern:

### 1. Untersuchungen zur Leerlaufdrehzahl

In experimentellen Untersuchungen soll zunächst die Frage geklärt werden, welche Leerlaufdrehzahl bei eingestellter Leitapparatöffnung erreicht wird. Ausgehend von dieser Datengrundlage wird zunächst eine Leerlaufdrehzahlkennlinie in Abhängigkeit der Leitapparatstellung ermittelt. Die Daten dienen ebenso als Basis zur Untersuchung der Öffnungs- bzw. Schließcharakteristik des Leitapparats.

### 2. Implementierung der Anfahrautomatik in LabVIEW

Nach Abschluss der Voruntersuchung soll eine entsprechende Programmlogik entwickelt werden und als Anfahrautomatik in das bestehende Steuerungsprogramm am Prüfstand implementiert werden. Die Umsetzung erfolgt dabei in LabVIEW 2016.

Die Realisierung soll durch hinterlegte Anfahrparameter erfolgen. Dazu wird der Leitapparat, je nach ausgewählter Rampe, nach einer zeitlichen Vorgabe bis zu einer definierten Leitapparatstellung geöffnet. Je nach Leitapparatöffnung stellt sich am Prüfstand eine dementsprechende Drehzahl ein. Als Eingangsparameter sollen dabei die gewünschte Drehzahl, sowie verschiedenen Anfahrparameter zur Verfügung stehen.

### 3. Untersuchungen zum Maschinenstart (startup)

Im weiteren Verlauf der Arbeit sollen Messungen für verschiedene Anfahrparameter durchgeführt werden. Dabei soll zunächst die Qualität der Anfahrautomatik beurteilt werden, sowie den Einfluss einzelner Anfahrparameter auf den Hochfahrvorgang. Abschließend sollen die erhaltenen globalen Betriebsparameter mit einschlägiger Fachliteratur verglichen werden. Aus dem Literaturvergleich soll die Frage geklärt werden, ob die Verhältnisse zwischen einzelnen Betriebsparametern an der Modellmaschine qualitativ dieselben Verhältnisse aufweisen wie jene an Prototypen in realen Großanlagen. Ebenso sollte aus dem Vergleich hervorgehen, ob es zu einem starken Überschwingen der Betriebsparameter kommt. Anhand der gesammelten Messdaten und den Erkenntnissen aus dem Literaturvergleich soll eine Beurteilung der Anfahrparameter erfolgen, um schlussendlich jene in das Steuerungsprogramm einzuarbeiten, welche den Anfahrvorgang so realitätsnah wie möglich abbilden.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Strömungsverhältnisse am Laufrad

#### 2.1.1 Geschwindigkeitsdreiecke

Die nachfolgenden Überlegungen basieren auf den Grundlagen von [8] und [9] auf.

Möchte man den im Laufrad zurückgelegten Weg eines Fluidteilchens beschreiben, so empfiehlt sich die Beschreibung der Strömung mittels Relativkinematik. Die relative Fluidbewegung entlang des Laufrads ist durch Bahnkurven vorgegeben, welche im Grunde von der Schaufelgeometrie bestimmt sind. Das rotierende Laufrad stellt das Führungssystem dar und die dadurch vorhandene Umfangsgeschwindigkeit stellt zugleich die Führungsgeschwindigkeit des Führungssystems dar. Man erhält die absolute Strömungsgeschwindigkeit  $\vec{c}$  durch vektorielle Addierung von Relativgeschwindigkeit  $\vec{w}$  und Führungs- bzw. Umfangsgeschwindigkeit  $\vec{u}$ :

$$\vec{c} = \vec{w} + \vec{u} \quad (2.1)$$

Die Geschwindigkeitskomponenten können an den Bilanzflächen am Laufrad eingezeichnet werden, wie in Abbildung 2.1 dargestellt. Die Komponenten unmittelbar vor dem Laufradeintritt werden mit dem Index 1 gekennzeichnet, jene direkt nach dem Austritt mit Index 2.

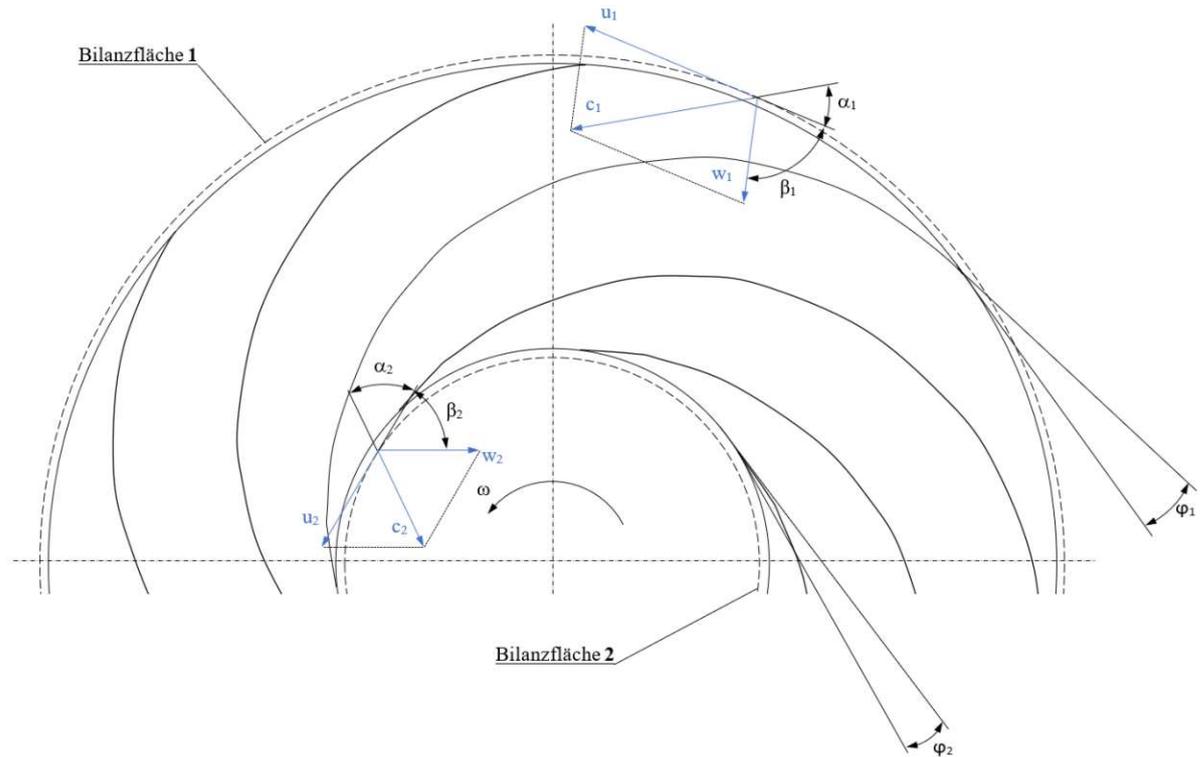


Abbildung 2.1: Geschwindigkeitsverhältnisse am Laufrad

Die von einem am Laufrad sitzenden Beobachter wahrgenommene Relativgeschwindigkeit am Schaufelanzfang  $w_1$  wird in ihrer Richtung durch den Winkel  $\beta_1$  festgelegt. Der Schaufelwinkel  $\phi_1$  am Eintritt ist nicht gleich dem Winkel  $\beta_1$ . Es existiert also eine Winkelabweichung, auch Inzidenzwinkel  $i$  genannt. Aufgrund dieser schlagartigen Umlenkung erfolgt am Eintritt ein Stoß und es treten Verluste auf. Ein stoßfreier Eintritt setzt einen Inzidenzwinkel  $i = 0$  voraus, man spricht von einer schaufelkongruenten Strömung. Diese Vorgabe könnte nur für unendlich viele und unendlich dünne Schaufeln erfüllt werden.

Im Absolutsystem betrachtet, erfolgt die Beschreibung der Strömung am Eintritt durch die Absolutgeschwindigkeit  $c_1$  unter dem Winkel  $\alpha_1$  und am Austritt durch die Absolutgeschwindigkeit  $c_2$  und dem Winkel  $\alpha_2$ . Der Eintrittswinkel  $\alpha_1$  wird im Wesentlichen von der Stellung der Leitapparatschaufel bestimmt.

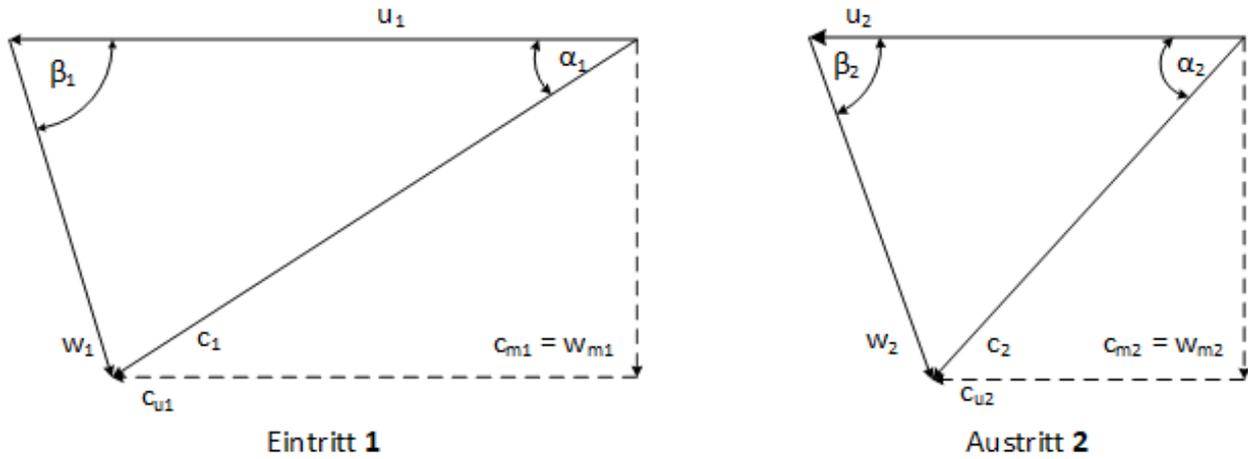


Abbildung 2.2: Geschwindigkeitsdreiecke am Eintritt (links) und am Austritt (rechts): Darstellung von Absolut- und Relativgeschwindigkeit mit ihren dazugehörigen Komponenten parallel und senkrecht zur Umfangsgeschwindigkeit.

Zur Berechnung werden Absolut- und Relativgeschwindigkeit in Komponenten parallel und senkrecht zur Umfangsgeschwindigkeit zerlegt. Der Index  $u$  kennzeichnet dabei die parallele Komponente, Index  $m$  die senkrechte. Die vollständigen Geschwindigkeitsdreiecke für Eintritt und Austritt sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Die Meridiangeschwindigkeiten  $c_m$  und  $w_m$  können mittels Kontinuitätsgesetz berechnet werden. Die Umfangskomponente  $c_u$  ist ein Maß für den Drall. Ist diese am Austritt  $c_{2u} = 0$ , so spricht man von einer drallfreien Abströmung.

### 2.1.2 Leerlaufverhalten bei konstanter Leitapparatöffnung

Der nachfolgende Teil dieser Arbeit soll die Auswirkung einer Änderung der Betriebsparameter bei gleichbleibender Leitapparatöffnung  $\alpha$  zeigen. In Abbildung 2.3 sind die Strömungsverhältnisse unmittelbar vor dem Laufradeintritt (links, Index 1) und direkt nach dem Laufradaustritt (rechts, Index 2) in Form von Geschwindigkeitsdreiecken schematisch dargestellt. Die Geschwindigkeiten mit hochgestelltem Index stellen einen veränderten Betriebspunkt dar.

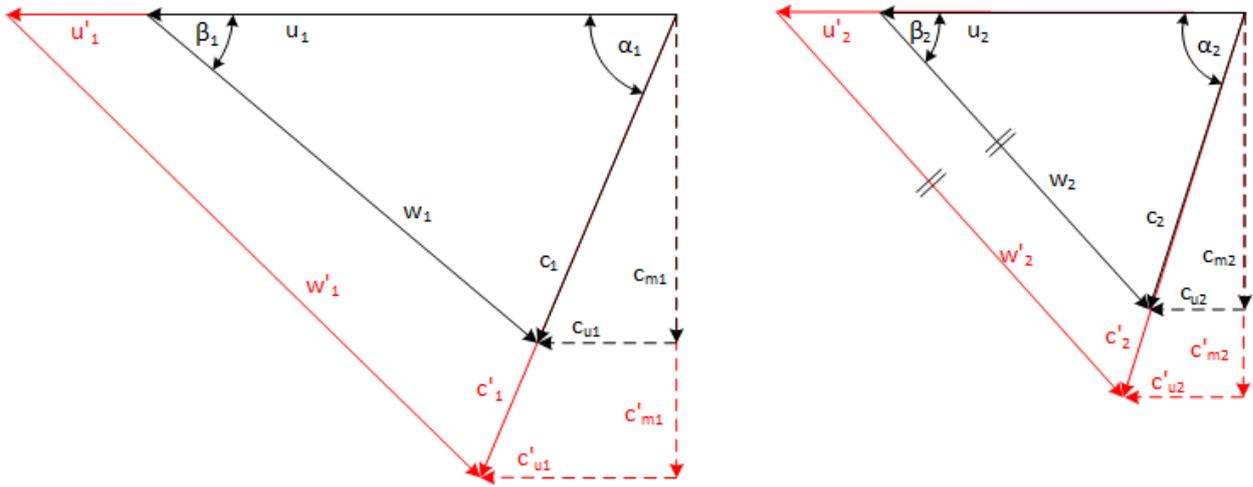


Abbildung 2.3: Geschwindigkeitsdreiecke am Laufradeintritt (links) und am Laufradaustritt (rechts); dargestellt für zwei Betriebspunkte im lastfreien Fall bei unveränderter Leitapparatstellung

Ausgehend von der Eulerschen Impulsmomentengleichung zur Berechnung des vom Fluid an das Laufrad abgegebene Moment  $M_R$  bzw. vom Laufrad aufgenommene Moment  $M_L$ , bei konstanter Dichte ( $\rho_1 = \rho_2$ )

$$M_L = -M_R = \rho \cdot Q_T \cdot (r_1 c_1 \cos \alpha_1 - r_2 c_2 \cos \alpha_2) \quad [10] \quad (2.2)$$

gilt für den stationären Leerlauf, unter Vernachlässigung jeglicher Verluste

$$M_L = -M_R = 0. \quad (2.3)$$

Unter der Berücksichtigung der Annahme aus Gleichung 2.3, folgt Gleichung 2.2 zu

$$r_1 c_1 \cos \alpha_1 = r_2 c_2 \cos \alpha_2. \quad (2.4)$$

Aus den Geschwindigkeitsdreiecken in Abbildung 2.3 folgt der geometrische Zusammenhang

zwischen  $c_1$  und  $c_{m1}$  zu

$$c_1 = \frac{c_{m1}}{\sin\alpha_1}; \quad c_2 = \frac{c_{m2}}{\sin\alpha_2}. \quad (2.5)$$

Laut [8] können die Meridiangeschwindigkeiten  $c_{m1}$  und  $c_{m2}$  aus dem Volumenstrom berechnet werden

$$c_{m1} = \frac{Q_{T1}}{A_1\tau_1}; \quad c_{m2} = \frac{Q_{T1}}{A_2\tau_2}. \quad (2.6)$$

Durch die Verengungsfaktoren  $\tau_1$  und  $\tau_2$  werden die Querschnittsverengungen durch die Schaufeldicke und der Grenzschichteinfluss am Turbineneintritt bzw -austritt berücksichtigt. Diese werden in der weiteren Berechnung als konstant angenommen.

Für inkompressible Medien ( $\rho_1 = \rho_2$ ) folgt aus der Kontinuitätsgleichung, dass der Durchfluss am Turbineneintritt  $Q_{T1}$  gleich jenen am Turbinenaustritt  $Q_{T2}$  sein muss:

$$Q_{T1} = Q_{T2} \quad (2.7)$$

bzw. als Zusammenhang zwischen der durchströmten Fläche  $A$ , dem Verengungsfaktor  $\tau$  und der Meridiangeschwindigkeit

$$c_{m1}A_1\tau_1 = c_{m2}A_2\tau_2. \quad (2.8)$$

Setzt man nun Gleichung 2.5 in Gleichung 2.4 ein, folgt

$$r_1c_{m1} \frac{\cos\alpha_1}{\sin\alpha_1} = r_2c_{m2} \frac{\cos\alpha_2}{\sin\alpha_2} \quad (2.9)$$

und ersetzt  $c_{m2}$  durch Gleichung 2.8, so folgt

$$r_1c_{m1} \frac{\cos\alpha_1}{\sin\alpha_1} = r_2c_{m1} \frac{A_1\tau_1}{A_2\tau_2} \frac{\cos\alpha_2}{\sin\alpha_2}. \quad (2.10)$$

Nach einiger Berechnung kann Gleichung 2.10 vereinfacht werden

$$\tan\alpha_1 = \frac{r_1 A_2 \tau_2}{r_2 A_1 \tau_1} \tan\alpha_2. \quad (2.11)$$

Da  $r$ ,  $A$  und  $\tau$  konstante Parameter der Turbine sind, muss folgen, dass  $\alpha_1 \sim \alpha_2$  gilt.

Für die weitere Betrachtung werden folgende Randbedingungen angenommen:

- Es wurde  $\alpha_1 \sim \alpha_2$  hergeleitet
- Es gilt  $\alpha_1 \neq \alpha_2$
- Der Strömungswinkel am Eintritt muss nicht mit dem geometrischen Schaufelwinkel übereinstimmen  $\beta_1 \neq \phi_1$
- Für unterschiedliche Betriebspunkte muss der Strömungswinkel am Eintritt nicht konstant sein  $\beta_1 \neq konst.$
- Es wird die Annahme getroffen, dass der Strömungswinkel annähernd mit dem geometrischen Schaufelwinkel am Austritt übereinstimmt  $\beta_2 \approx \phi_2 = konst.$

Hält man die Leitapparatstellung  $\alpha_1$  nun konstant und erhöht den Durchfluss  $Q_T$ , so wird auch die Meridiangeschwindigkeit  $c_{m1}$  und dazu proportional auch die Absolutgeschwindigkeit  $c_1$  am Eintritt größer. Aufgrund von  $\alpha_1 \sim \alpha_2$  muss dies auch für  $c_{m2}$  und  $c_2$  gelten. Aus der Vereinfachung, dass der Strömungswinkel am Laufradaustritt  $\beta_2$  gleich dem geometrischen Schaufelwinkel  $\phi_2$  ist, folgt, dass die Umfangsgeschwindigkeit  $u_2$  größer werden muss. Daraus kann schlussgefolgert werden, dass für konstante Leitapparatstellungen  $\alpha_1$  bei einer Erhöhung des Durchflusses, die Drehzahl im Leerlauf ( $n = \frac{u_2}{\pi D_2}$ ) steigen muss.

Im regulären Betrieb ist die Fallhöhe in Großanlagen konstant und der Durchfluss wird über die Öffnung des Leitapparats geregelt. Die Synchronisation des Generators mit dem Netz erfolgt bei vorher definierter Leitapparatstellung und daraus folgt, bei konstant bleibender Fallhöhe, ein definierter Durchfluss für den Synchronisationspunkt. Am Laborprüfstand werden Fallhöhe und Durchfluss von der Versorgungspumpe generiert und über die Pumpendrehzahl geregelt. Wie vorhin gezeigt wurde, muss sich eine Erhöhung des Durchflusses bei  $\alpha_1 = konst.$  in der Zunahme der Leerlaufdrehzahl widerspiegeln. Die Fallhöhe fließt in dieser Herleitung nicht direkt mit ein und für konstante Leitapparatöffnungen kann diese hauptsächlich über die Pumpendrehzahl beeinflusst werden. Es existiert ein direkter Zusam-

menhang zwischen Durchfluss und Fallhöhe. Weil für  $\alpha_1 = konst.$  die Leerlaufdrehzahl durch Steigerung des Durchflusses erhöht wird, wird sich im Zuge dessen auch eine größere Fallhöhe einstellen.

## 2.2 Definition der Leerlaufdrehzahl

Die Leerlaufdrehzahl, in weiterer Folge mit  $n$  bezeichnet, wird in der vorliegenden Arbeit bewusst von der Durchgangsdrehzahl  $n_r$  abgegrenzt. Letztere wird meist als Vielfaches der Nenndrehzahl  $n_N$  bei nomineller Fallhöhe definiert und liegt für Francis-Turbinen im Bereich von 1,8 für Langsamläufer bis 2,1 für Schnellläufer [9]. Kommt es zu einem Lastabfall bei gleichzeitig unverändertem oder nahezu unverändertem Durchfluss, so dreht die Maschine bis zu einer definierten Drehzahl hoch, bis sich ein Gleichgewicht an der Maschine einstellt. Die verfügbare Energie wird gänzlich in Verluste umgesetzt. Sie stellt ein wichtiges Auslegungskriterium für den Generator dar.

Um die Begriffserklärungen voneinander abzugrenzen, wird in weiterer Folge die Leerlaufdrehzahl als stationäre und lastfreie Drehzahl für einen beliebigen Betriebspunkt definiert. Hier gilt ebenso, dass die verfügbare Energiemenge nach Erreichen eines stationären Zustandes, in Schall und Wärme umgesetzt wird.

Wie aus dem Momentengleichgewicht in Abbildung 2.4 ersichtlich ist, kann das Drehmoment  $T_L$  am Laufrad wie folgt berechnet werden:

$$T_L = T_G + T_{LR} \quad (2.12)$$

Im Gleichgewichtszustand nimmt die Turbinendrehzahl  $n_T$  den Wert der Leerlaufdrehzahl ein und das Drehmoment  $T_L$  am Laufrad entspricht den Lagerreibungsverlusten  $T_{LR}$ . Die Leerlaufdrehzahl ist demnach als jene Drehzahl definiert, bei der das Motordrehmoment  $T_G = 0$  ist.

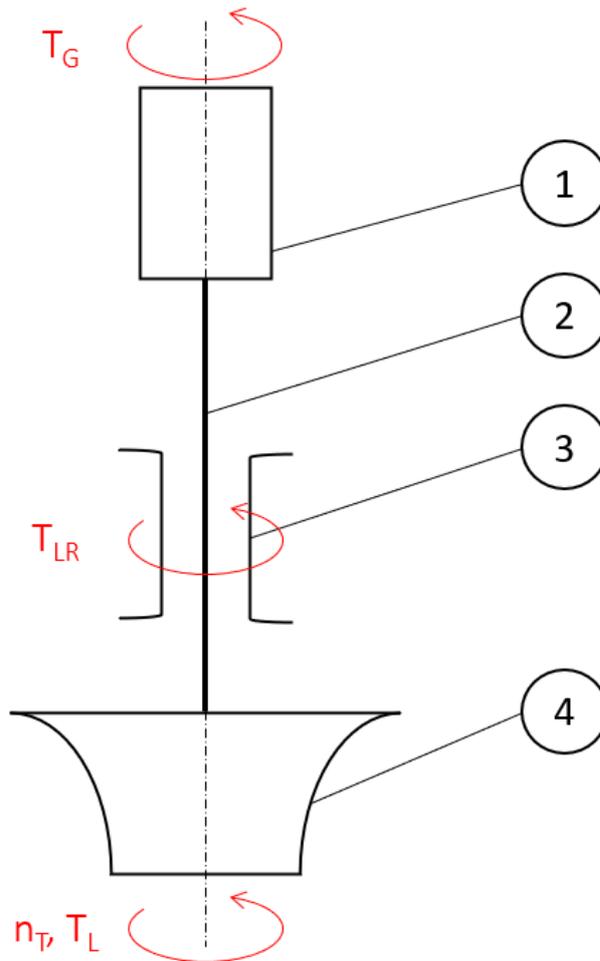


Abbildung 2.4: Momentengleichgewicht am Wellenstrang: 1 Motorgenerator, 2 Welle, 3 hydrostatisches Lager, 4 Laufrad

## 2.3 Maschinenstart

Der Betrieb von Wasserkraftturbinen kann nach [11] in mehrere Lastbereiche eingeteilt werden. Diese gliedern sich wie folgt:

- Hochfahren (Start-Up)
- Lastfreier Leerlaufbetrieb
- Tiefer Teillastbetrieb
- Teillastbetrieb

- Betrieb im besten Wirkungsgradpunkt
- Volllastbetrieb
- Phasenschieberbetrieb

Während des Start-Up wird die Maschine aus dem Stillstand auf eine bestimmte Drehzahl beschleunigt. Bei Verwendung von Synchrongeneratoren wird die Turbine in den Bereich nahe der Synchrondrehzahl hochgefahren. Dies geschieht durch Öffnen des Leitapparats auf einem der Fallhöhe und Drehzahl entsprechenden Wert. Sobald sich eine konstante Drehzahl eingestellt hat, erfolgt die Netzsynchrosation. Ab diesem Zeitpunkt befindet sich die Maschine im lastfreien Leerlaufbetrieb. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich ausschließlich um den Zeitraum vom Stillstand bis zum Erreichen einer konstanten Drehzahl, jedoch ohne Netzsynchrosation.

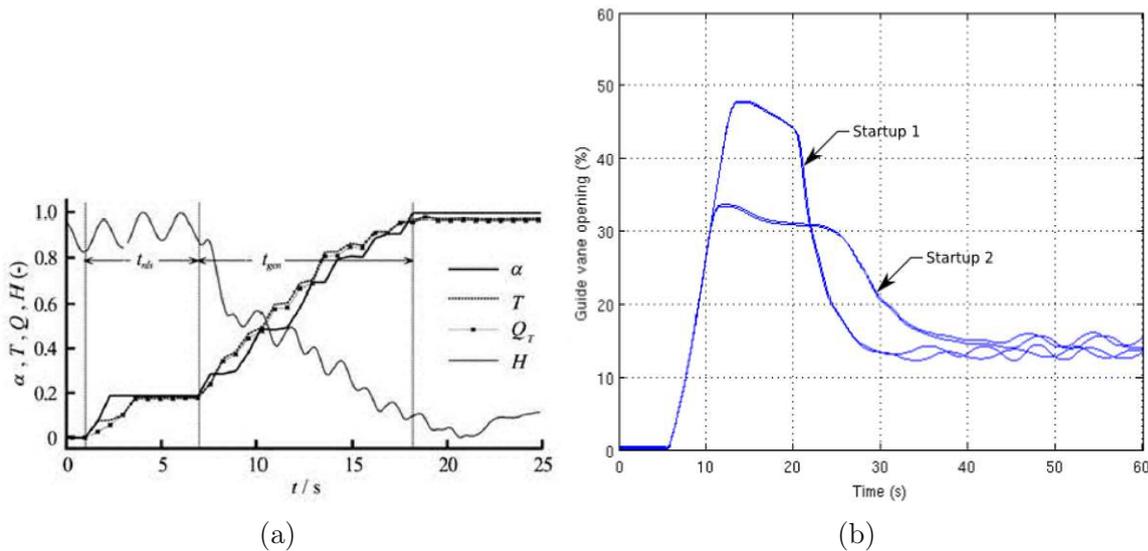


Abbildung 2.5: Hochfahrschema nach [12] (a) ohne und nach [13] (b) mit Übersteuern

In der Literatur finden sich unterschiedliche Hochfahrchemata. Während [12] und [14] von einer linearen Öffnungscharakteristik ohne Übersteuern der Leitapparatöffnung ausgehen, nehmen [15] und [13] in ihren Untersuchungen ein Übersteuern der Leitapparatöffnung über den Endwert an. Das bedeutet, dass der Leitapparat in einer ersten Phase bis zu einem Wert über dem Endwert auffährt und anschließend bis zum Endwert geschlossen wird. In Abbildung 2.5 sind ein Hochfahrschema ohne (a) bzw. mit (b) übersteuern dargestellt. Auf der Abszissenachse ist jeweils die Zeit in Sekunden und auf der Ordinatenachse die Leitapparatöffnung dargestellt. Die in Abbildung 2.5 visualisierten Messdaten wurden an einer Francis-Turbine im Kraftwerk Beaharnois in Quebec Kanada aufgezeichnet.

## 3 Versuchsaufbau

Im folgenden Kapitel wird der Aufbau des Universalprüfstands für Pumpen und Turbinen am Institut für Energietechnik und Thermodynamik an der Technischen Universität Wien beschrieben. Nach einem allgemeinen Überblick über den Aufbau des Versuchsstands setzt dieses Kapitel mit der Beschreibung der für diese Arbeit essentiellen Instrumentierung und der Messwerterfassung fort. Weiters wird besonders auf das bestehende Steuer- und Messprogramm und dessen Adaptierung hinsichtlich eines automatisierten Maschinenstarts eingegangen. Abschließend folgen die Erkenntnisse aus der Inbetriebnahme des veränderten Steuer- und Messprogramms.

### 3.1 Pumpturbinenprüfstand

Die experimentellen Untersuchungen der Leerlaufdrehzahlen für verschiedene Betriebspunkte, sowie der optimalen Betriebsparameter für realitätsnahe Anfahrzyklen, wurden am Pumpturbinenprüfstand im Labor für hydraulische Strömungsmaschinen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde der Versuchstand als geschlossener Kreislauf betrieben. In Abbildung 3.1 ist der Versuchskreislauf schematisch dargestellt. Zunächst wird der Kreislauf über die Versorgungspumpe (7) mit Wasser aus dem Versorgungsbecken (23) gefüllt. Durch Schließen der Absperrklappe (21) wird das Versorgungsbecken vom restlichen System getrennt, wodurch ein geschlossener Kreislauf erzeugt wird. Die Versorgungspumpe (7) wird im geschlossenen Kreislauf ebenso als Kreislaufpumpe verwendet und ist als Radialpumpe mit einer Aufnahmeleistung von 200 kW ausgeführt. Diese fördert das Arbeitsmedium aus dem Unterwasserkessel (6) über eine Rohrleitung in den Oberwasserkessel (1), der das Oberwasserbecken simuliert, und somit die erforderliche Fallhöhe für die Modellmaschine (2) erzeugt. Diese kann im Turbinen- bzw. im Pumpbetrieb betrieben werden und ist über einen Wellenstrang mit dem Motorgenerator (5) verbunden. Dieser verfügt über eine Leistung von 400 kW. Abhängig von der Betriebsart, kann er im Generatorbetrieb Leistung von der Turbine aufnehmen

und in das elektrische Netz rückspeisen oder als Motor das Laufrad antreiben. In dem das Saugrohr mit dem Unterwasserkessel verbunden ist, wird ein geschlossener Kreislauf erzeugt. Die Durchflussmessung (8) ist in der Rohrleitung zwischen Versorgungspumpe und Oberwasserkessel positioniert. Um möglichst konstante Betriebsbedingungen zu gewährleisten, kann das Kreislaufwasser über einen Wärmetauscher (15) gekühlt werden.

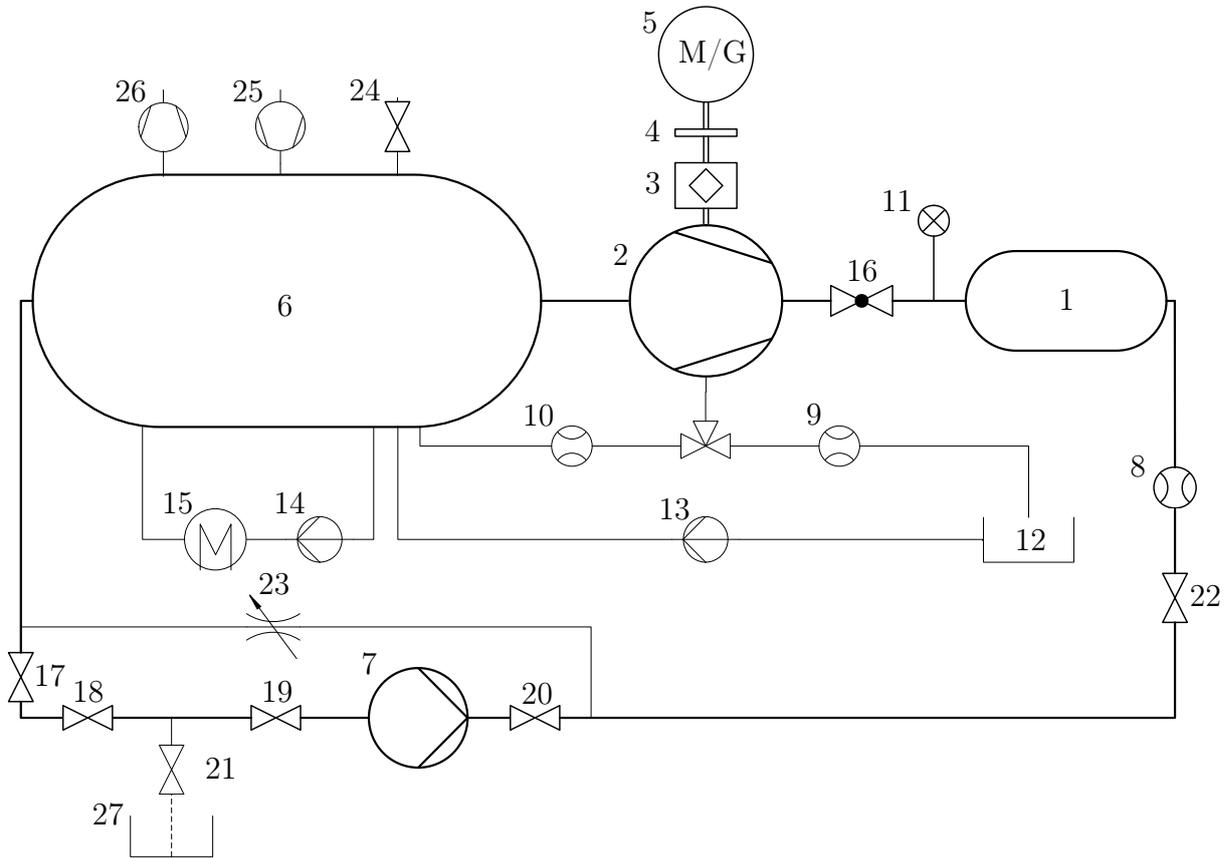


Abbildung 3.1: Anlagenschema Pumpturbinenprüfstand: 1 Oberwasserkessel, 2 Modellmaschine, 3 hydrostatisches Lager, 4 Drehmomentenmessflansch, 5 Motorgenerator, 6 Unterwasserkessel, 7 Versorgungspumpe, 8 Durchflussaufnahme, 9 und 10 Spaltwasser-Durchflussaufnahme, 11, Druckaufnehmer, 12 Ausgleichbehälter, 13 Ausgleichspumpe, 14 Kühlwasserpumpe, 15 Wärmetauscher-Triebwasser, 16 Kugelschieber, 17 - 22 Absperrklappe, 23 Nadelventil, 24 Entlüftungsventil, 25 Druckluftkompressor, 26 Vakuumpumpe, 27 Versorgungsbecken

### 3.1.1 Laufrad

Laut [16] ist das verbaute Laufrad ein homologes Modell einer Großausführung. Im Turbinenbetrieb beträgt die spezifische Drehzahl  $n_q = 41,6 \text{ min}^{-1}$  und im Pumpbetrieb  $n_q = 41,8 \text{ min}^{-1}$ . Es besteht aus sieben Laufschaufeln und weist einen Durchmesser am Eintritt von  $D_1 = 0,4875 \text{ m}$  und am Turbinenaustritt von  $D_2 = 0,2764 \text{ m}$  auf. Der optimale Betriebspunkt der Modellmaschine stellt sich bei einer Fallhöhe von  $68,64 \text{ m}$  und bei einem Durchfluss von  $0,377 \text{ m}^3/\text{s}$ , bei einer Drehzahl von  $1500 \text{ U/min}$  ein [17].

### 3.1.2 Leitapparat

Das Spiralgehäuse besteht aus zwei gefrästen Blockgehäusehälften und beinhaltet 20 Stützschaufeln, welche den sogenannten Stützschaufelring darstellen. Dieser dient als Verbindungselement zwischen Spirale und Leitapparat. Abbildung 3.2 zeigt einen Halbschnitt durch die Modellmaschine. Darin sind die wesentlichen Komponenten, wie Linearantrieb, Verstellring, Stütz- und Leitschaufeln, Laufrad und Spiralgehäuse zu sehen.

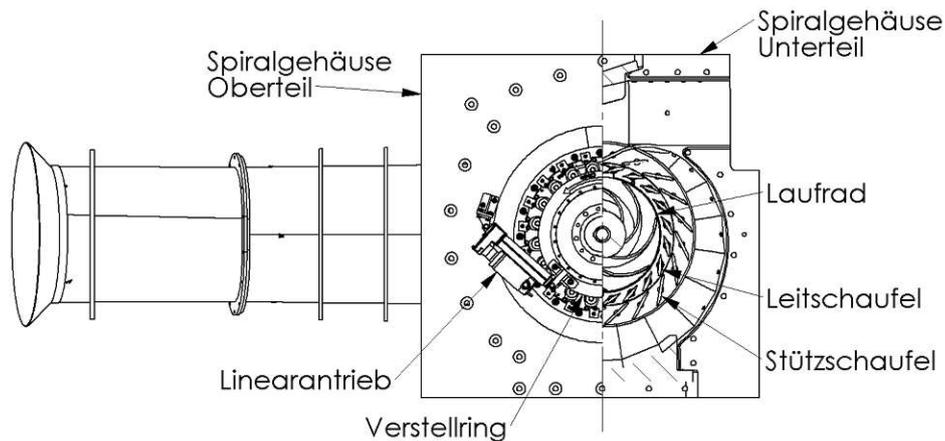


Abbildung 3.2: Halbschnitt durch die Modellmaschine: Leitapparatverstellung bestehend aus Leitschaufeln, Verstellring und Linearantrieb

Der Leitapparat stellt eine wichtige Komponente der vorliegenden Arbeit dar und wird deshalb im Folgenden näher betrachtet. Die 20 radial angeordneten Leitschaufeln sind über den sogenannten Verstellring miteinander verbunden und bilden somit den verstellbaren Leitapparat. Die Verstellung erfolgt über einen Linearantrieb und der Absolutwert der Leitschaufelstellung wird über einen Drehgeber erfasst. Die Zylinderstange ist am Verstellring

gelenkig angebracht und das andere Ende des Antriebs stützt sich gegen einen am Spiralgehäuse angebrachten Winkel ab. Die technischen Daten des Linearantriebs sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Technische Daten des Linearantriebs

Hersteller	RACO
Typ	K6E4, Nr.: 13023
ID-Nr.	154-200-1
Nennleistung	0,5kW
Nennstrom	3,5A
Zylinderhub	200mm
Zylinderkraft	2,5kN
Verstellgeschwindigkeit	100mm/s
Anschlussmaß $a_3$	380mm
interne Positionsgeberauflösung	512 Pulse/Umdrehung

Die Leitschaukeln, welche die Anströmung des Laufrades beeinflussen, können durch einen Drehmechanismus komplett geschlossen oder je nach Betriebszustand bis zu  $35^\circ$  geöffnet werden. Dazu ist auf den herausgeführten Wellen der Leitschaukeln je ein Anlenker fixiert. Diese sind über Nutführungen im Verstellring gleichzeitig drehbar und der Verstellring ist spielfrei auf einem Führungsring gelagert. Zur Verstellung aller Leitschaukeln muss nun nur der Verstellring durch einen Antriebsmechanismus gedreht werden.

### Leitapparatverstellung

Nach jeder Initialisierung des Prüfstands führt der Linearantrieb eine Referenzfahrt aus der Nullposition durch. Diese entspricht dem Zylinderhub bei maximaler Leitapparatöffnung. Bei eingefahrenem Zylinder ist der Leitapparat vollständig geöffnet, d.h. während der Leitapparat öffnet, fährt der Linearantrieb ein. Nach dem Referenzieren kann jede beliebige Position zwischen den beiden Endpunkten angefahren werden. Von der Steuerwarte aus wird ein Sollwert von 0 bis 100 % an die SPS vorgegeben, welche ein skaliertes Stromsignal an den Linearantrieb weiterleitet. Ein an einer Leitschaukel montierter Inkrementalgeber gibt die absolute Stellung der Leitschaukel unabhängig vom Antrieb wieder.

Zur erleichterten Betrachtung wird im Folgenden das Kräftegleichgewicht an den Leitschau-

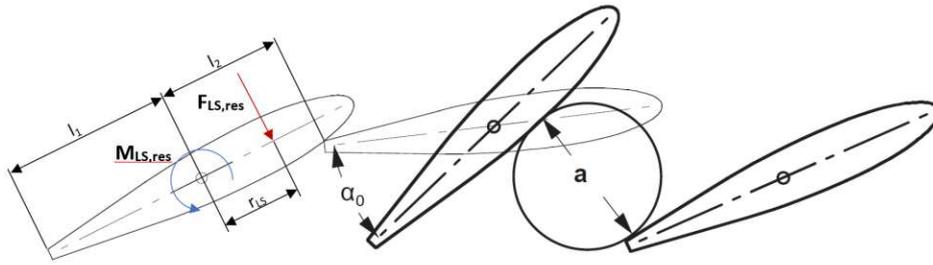


Abbildung 3.3: Leitschaufelöffnung und Angriffspunkt der resultierenden Druckkraft nach [10], eigene Adaptierung

feldern im geschlossenen Zustand betrachtet. Dabei wird die Durchflussgeschwindigkeit als verschwindend klein angenommen, so dass die Druckverhältnisse an einer einzelnen Leitschaufel als statisch angesehen werden können. Der auf das Schaufelprofil wirkende statische Druck kann als resultierende Kraft  $F_{LS,res}$  in einen Kraftangriffspunkt reduziert werden. Nach [18] kann diese wie folgt berechnet werden:

$$F_{LS,res} = \rho \cdot g \cdot H \cdot (l_1 + l_2) \cdot b_0 \quad (3.1)$$

Der Parameter  $b_0$  gibt dabei die Schaufelhöhe an. Eine grafische Darstellung der wirkenden Kräfte und Momente ist in Abbildung 3.3 zu sehen. Der Kraftangriffspunkt liegt in diesem Beispiel rechts vom Drehpunkt. Das hat zur Folge, dass sich die Leitschaufel aufgrund der einwirkenden Druckkraft gegen die nachfolgende Schaufel abstützt und sich somit positiv auf das Abdichten des Leitapparates auswirkt. Nachteilig ist jedoch die Tatsache, dass das vom Linearantrieb über den Verstellring aufgebrachte und entgegenwirkende Moment  $M_{LS,res}$  gegen die Fluidströmung arbeiten muss.

## 3.2 Instrumentierung

Das nachfolgende Unterkapitel beschäftigt sich mit der für die vorliegende Arbeit relevanten Messtechnik. Eine tabellarische Übersicht über die wichtigsten Messaufnehmer und deren Kenndaten ist aus Tabelle 3.2 zu entnehmen.

Tabelle 3.2: Auflistung der relevanten Messaufnehmer und deren wesentlichen Daten

	Messwert	Aufnehmer	Hersteller	Ausgang	Messbereich	Messabweichung
Druck	$p_1$	PMP51	E+H	4 ... 20 mA	-1 ... 9 bar	< 0,02% FS
	$p_2$	PMP51	E+H	4 ... 20 mA	-1 ... 9 bar	< 0,02% FS
	$\Delta p_{12}$	PMD55	E+H	4 ... 20 mA	0 ... 10 bar	< 0,02% FS
Durchfluss	$Q_1$	Promag 53W	E+H	4 ... 20 mA	-250 ... 250 l/s	$\pm 0,168\%$ MV
	$q^I$	Promag 12D25	E+H	4 ... 20 mA	0 ... 5 l/s	$\pm 0,1\%$ MV
Drehmoment	$T$	T12HP	HBM	-10 ... 10 VDC	-3 ... 3 kNm	0,1% MV
	$T_{Lm}$	Typ U1	HBM	-10 ... 10 VDC	11,7 ... -35,2 Nm	0,1% MV
Drehzahl	$n$	T12HP	HBM	-10 ... 10 VDC	2 ... 12000 U/min	
Leitapparatöffnung	$a$	ARS60	Sick	13,145 ... 16,41 mA	0 ... 35°	

### 3.2.1 Druckmessung

In Abbildung 3.4 sind die Messstellen der Drücke  $p_1$  und  $p_2$  bzw.  $\Delta p_{12}$  eingezeichnet. Die technischen Daten der Druckaufnehmer können aus Tabelle 3.2 entnommen werden.

Die Drücke am Spiraleintritt  $p_1$  und am Saugrohraustritt  $p_2$  werden mittels Relativdruckaufnehmern des Typs Cerabar M PMP51 des Herstellers *Endress und Hauser* erfasst. Diese sind auf einen Messbereich von -1 bis 9 bar eingestellt und messen gegen den Atmosphärendruck. Am Ausgang wird ein Stromsignal von 4 bis 20 mA ausgegeben. Der maximale Messabweichung beträgt 0,02%, bezogen auf den Messbereich.

Zur Ermittlung der Fallhöhe  $H$  wird der Differenzdruck  $\Delta p_{12}$  separat zwischen den Messstellen  $p_1$  und  $p_2$  durch einen Differenzdruckaufnehmer Deltabar M PMD55 des Herstellers *Endress und Hauser* erfasst. Dieser ist auf einen Messbereich von 0 bis 10 bar eingestellt und liefert ein am Ausgang ein Stromsignal von 4 bis 20 mA. Der maximale Messabweichung beträgt 0,02%, bezogen auf den Messbereich.

Die Fallhöhe berechnet sich demnach wie folgt:

$$H = \frac{\Delta p_{12}}{\rho g} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2g}. \quad (3.2)$$

Die Geschwindigkeiten an Druckseite  $c_1$  (Messstelle  $p_1$ ) und Saugseite  $c_2$  (Messstelle  $p_2$ ) er-

geben sich aus dem Durchfluss  $Q$  und der durchströmten Fläche an der jeweiligen Messstelle. Diese können über den druckseitigen Durchmesser  $D_S = 0,313m$  und den saugseitigen Durchmesser  $D_D = 0,5735m$  bestimmt werden.

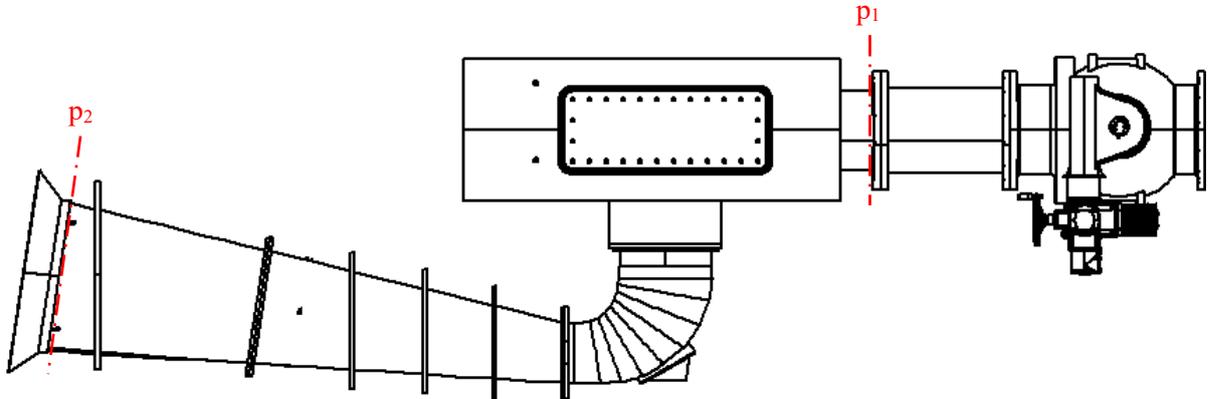


Abbildung 3.4: Druckmessstellen der Drücke  $p_1$  und  $p_2$  bzw. des Differenzdrucks  $\Delta p_{12}$

### 3.2.2 Durchflussmessung

Der Durchfluss wird mittels eines magnetisch-induktiven Messaufnehmers vom Typ Promag 53W der Firma *Endress und Hauser* aufgenommen. Wie in Abbildung 3.1 zu sehen ist, befindet sich die Messstelle (8) in der Hauptrohrleitung vor dem Oberwasserkessel. Folglich wird der zur Bilanzierung herangezogene Durchfluss  $Q_1$ , welcher der Turbine zugeführt wird, direkt gemessen. Die maximale Messabweichung beträgt 0,16% vom Messwert.

Der Spaltwasserstrom  $q$  wird ebenfalls mit Hilfe eines magnetisch-induktiven Durchflussaufnehmers des Typs Promag 12D25 der Firma *Endress und Hauser* gemessen. Die maximale Messabweichung beträgt 0,1%, bezogen auf den Messwert.

Wie in Abbildung 3.5 zu sehen ist, setzt sich der Durchfluss  $Q_1$  laut [19] wie folgt zusammen:

$$Q_1 = Q_m + q^I + q^{II} \quad (3.3)$$

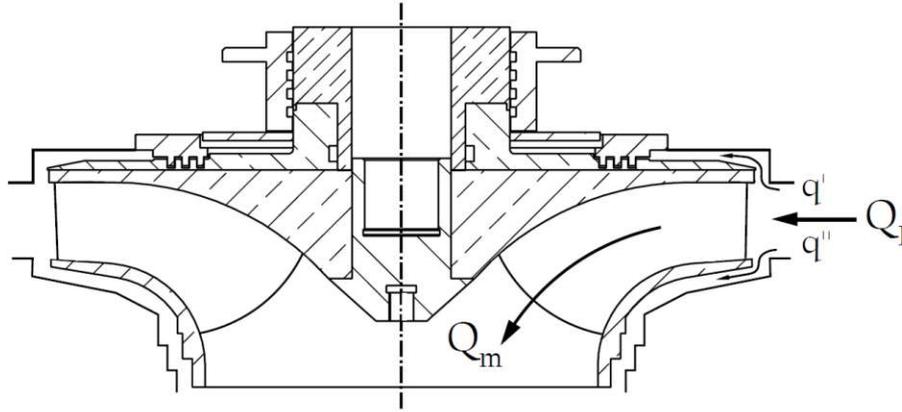


Abbildung 3.5: Aufteilung der Volumenströme nach [19]

### 3.2.3 Drehzahlmessung

Die Erfassung der Drehzahl erfolgt durch einen digitalen Aufnehmer des Typs T12HP des Herstellers *HBM*. Das Messprinzip beruht auf einer optischen Abtastung, mittels Infrarotlicht einer metallischen Schlitzscheibe mit 360 mechanischen Inkrementen. Die Abtastfrequenz beträgt  $72\text{ kHz}$ , bei einer Nenndrehzahl von  $12\,000\text{ U/min}$ . Die Mindestdrehzahl für eine ausreichende Impulsqualität muss einem Wert größer gleich  $2\text{ U/min}$  entsprechen. Die Ausgabe des Signals erfolgt als proportionales Spannungssignal von 0 bis  $10\text{ V}$ .

### 3.2.4 Drehmomentmessung

Ebenso wie die Drehzahlmessung, erfolgt die Erfassung des Wellendrehmoments  ${}_wT$  über den Drehmoment-Messflansch T12Hp des Herstellers *HBM*. Der Messaufnehmer liefert ein Spannungssignal von  $-10\text{ V}$  bis  $10\text{ V}$ , direkt proportional zu einem Drehmoment von  $-3\text{ kNm}$  bis  $3\text{ kNm}$ . Bei Null-Drehmoment wird am Ausgang ein Spannungssignal von  $0\text{ V}$  ausgegeben. Die Messabweichung beträgt  $0,1\%$  vom Messwert.

Das Verlustmoment  $T_{LR}$  aufgrund der Lagerreibung wird über eine Drehmomentenstütze von einer Kraftmesszelle Typ U1 des Herstellers *HBM* erfasst. Bezogen auf den Messwert, weist dieser eine Messabweichung von  $0,1\%$  auf.

Das Drehmoment  $T_L$  am Laufrad kann wie folgt errechnet werden:

$$T_L = T_W + T_{LR} \quad (3.4)$$

Bei Nulldrehmoment liefert der Messaufnehmer ein Spannungssignal am Ausgang von  $0\text{ V}$ . Bei positiven bzw. negativen Nenndrehmoment von  $3\text{ kNm}$  beträgt das Ausgangssignal  $+10\text{ V}$  bzw.  $-10\text{ V}$ .

### 3.3 Messwerterfassung und Steuerung

Die Messwerterfassung und Steuerung von Leitapparat, Motorgenerator und Versorgungspumpe, erfolgt im Wesentlichen mit des im Rahmen der Dissertation von Edinger [20] erstellten und in der Diplomarbeit von Maly [16] weiterentwickelten Messprogramms. Dieses wurde für die Messwerterfassung der Leerlaufdrehzahlkennlinien in Kapitel 4 verwendet und dient in weiterer Folge als Ausgangspunkt für die Implementierung der Anfahrautomatik am Prüfstand. Eine nähere Betrachtung der Programmstruktur und Visualisierung erfolgt in Kapitel 5.

Am Prüfstand sind zwei Messsysteme im Einsatz, die über einen Ethernet Switch mit dem Steuerrechner in der Leitwarte verbunden sind. Die Druck- und Durchflussmessungen erfolgen über Analogeingangsmodule NI-9203 der Firma *National Instruments*, welche im Messsystem cDAQ-9188 Ethernet Chassis verbaut sind. Der Universal-Messverstärker QuantumX MX-840 des Herstellers *HBM* erfasst das Wellendrehmoment  $T$ , das Reibmoment  $T_{Lm}$ , die Drehzahl  $n$  und die Leitapparatöffnung  $a$ .

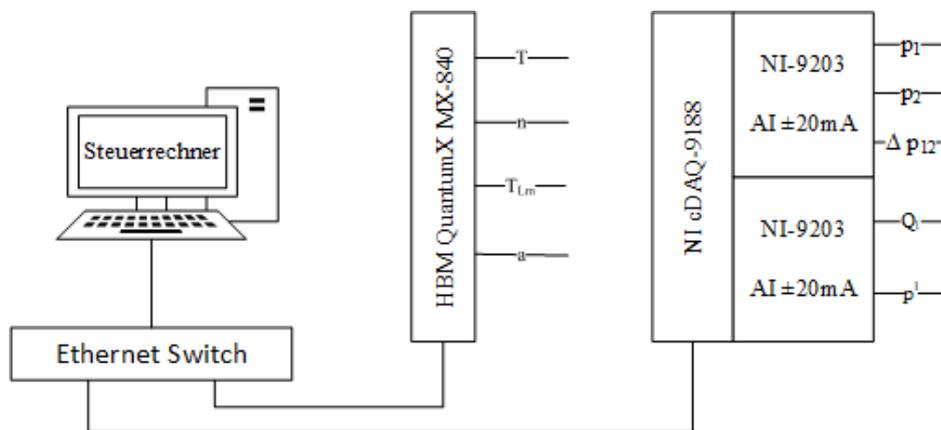


Abbildung 3.6: Schematischer Überblick der Messwerterfassung und Steuerung

## 4 Leerlaufdrehzahlkennlinie

Das folgende Kapitel widmet sich der experimentellen Ermittlung der Leerlaufdrehzahlkennlinie des Pumpturbinen-Versuchsstand. Im Fokus dieser Untersuchung steht hierbei der Einfluss der Leitapparatöffnung auf die Turbinendrehzahl. Die Erkenntnisse aus diesem Abschnitt werden in weiterer Folge in die Entwicklung der Anfahrautomatik in Kapitel 5 maßgeblich miteinfließen.

### 4.1 Messablauf zur Leerlaufdrehzahlkennlinienerfassung

Zunächst wurden im Zuge dieses Kapitels Messungen zur Vorbetrachtung durchgeführt. Dabei waren die Unterschiede im Betriebsverhalten, bis zum Erreichen der lastfreien Durchgangsdrehzahl, bei konst. anliegendem Druck  $p_1$  am Spiraleintritt, sowie bei konst. anliegender Fallhöhe  $H$  Gegenstand der Untersuchung. Um mögliche Beschädigungen am Prüfstand zu verhindern, wurde weiters die maximale Durchgangsdrehzahl, für die im Vorfeld ausgewählten Parameter ermittelt. Es wurden Messreihen für drei unterschiedliche Drück bzw. Fallhöhen durchgeführt. In jeder Messreihe wurden Leitapparatstellung von  $0^\circ$  bis  $35^\circ$  angesteuert. Die entsprechenden Messparameter sind in Tabelle 4.1 angeführt.

Tabelle 4.1: Messungen zur Vorbetrachtung: Anliegender Druck am Spiraleintritt  $p_1$  und anliegende Fallhöhe  $H$ ; angesteuerte Leitapparatstellung  $\alpha$  der Messungen

$p_1$ in bar	1	2	3						
$H$ in m	10	20	30						
$\alpha$ in $^\circ$	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	

Ausgehend von den Voruntersuchungen als Datengrundlage wurde ein Messplan zur Ermittlung der Leerlaufdrehzahlkennlinien erstellt. Gemäß Gleichung 3.2 setzt sich die Fallhöhe aus einer statischen und einer dynamischen Komponente zusammen. Für die Versuchsdurchführung ergeben sich daher zwei verschiedene Ansätze. Einerseits könnte der Druck am Eintritt der Spirale konstant gehalten werden. Dies steigende Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund einer steigenden Durchflussmenge zu einem Anstieg der Fallhöhe führen. Die zweite Möglichkeit wäre, den Druck am Spiraleintritt so anzupassen, dass die Fallhöhe über sämtliche Versuche hinweg konstant bleibt. In der Praxis kann die Fallhöhe während des Anfahrvorgangs als nahezu konstant angesehen werden, da bei ausreichend großen Speichervolumina die Absenkung des Oberwasserpegels vernachlässigbar ist. Daher wurden die weiteren Messungen unter konstanter Fallhöhe  $H$  durchgeführt. Die Leitapparatstellungen wurden mit mehreren Zwischenpositionen von  $0^\circ$  bis  $35^\circ$  angesteuert. Tabelle 4.2 zeigt die Messparameter in einer übersichtlichen Auflistung.

Tabelle 4.2: Messungen der Leerlaufdrehzahl: Anliegende Fallhöhe  $H$  am Spiraleintritt; angesteuerte Leitapparatstellung  $\alpha$  der Messungen

$H$ in $m$	10	15	20	25	30											
$\alpha$ in $^\circ$	min.	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	
	30,0	32,5	35													

Der Messablauf der Vorbetrachtung bzw. zur Ermittlung der Leerlaufdrehzahl erfolgte ident. Im Falle der Bestimmung der Leerlaufdrehzahl wurden die Messreihen ausschließlich für unterschiedliche Fallhöhen von  $10m$  bis  $30m$  in  $5m$ -Schritten aufgezeichnet.

Abbildung 4.1 zeigt die schematische Darstellung des verwendeten Versuchskreislaufs. Das System wurde über die Versorgungspumpe (7) mit Wasser aus dem Tiefbecken (27) bis zur vollständigen Füllung versorgt. Der Wasserstand im Oberwasserkessel wurde auf  $2m$  eingestellt. Durch Schließen der Absperrklappe (21) erfolgte eine Trennung des Tiefbeckens vom System, wodurch ein geschlossener Kreislauf (blau strichliert) erzeugt wurde. Innerhalb des Kreislaufs wurden alle Ventile vollständig geöffnet.

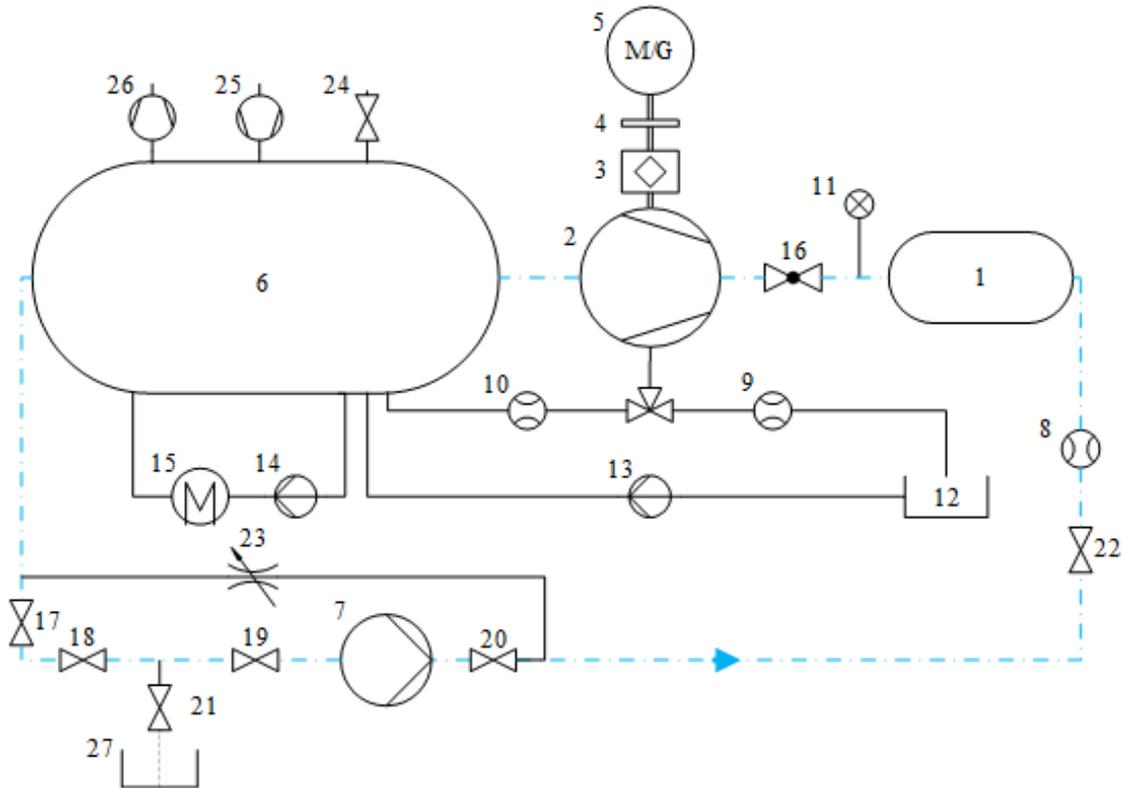


Abbildung 4.1: Leerlaufdrehzahlkennlinie Versuchskreislaufschema

Zu Beginn jeder Messreihe wurde der Kugelschieber (16) und der Leitapparat der Modellmaschine (2) geschlossen. Anschließend wurde der Druck  $p_1$  an der Messstelle (11) auf den Wert der jeweiligen Messreihe eingestellt und es erfolgte eine Initialmessung. Im nächsten Schritt wurde der Kugelschieber (16) geöffnet. Der Leitapparat blieb weiterhin geschlossen. Dieser Zustand stellte den Ausgangspunkt für jede Messreihe dar ( $\alpha = 0^\circ$ ). Mittels Änderung der Versorgungspumpendrehzahl wurde der Druck  $p_1$  bzw. die bilanzierte Fallhöhe  $H$  zwischen Spiraleintritt und Saugrohraustritt für jeden Messpunkt auf die entsprechenden Werte aus Tabelle 4.1 bzw. Tabelle 4.2 eingestellt. Anschließend wurde eine definierte Leitapparatstellungen  $\alpha$  angefahren. Nachdem sich eine stationäre Leerlaufdrehzahl an der Modellmaschine eingestellt hatte, erfolgte eine gemittelte Messpunktaufzeichnung über eine Messdauer von 20s. Der Motorgenerator (5) wurde nicht bestromt, sodass die Modellmaschine für jeden eingestellten Betriebspunkt ihre Leerlaufdrehzahl erreichen konnte. Innerhalb der Messreihe wurden somit alle Betriebspunkte für die vordefinierten Leitapparatstellungen  $\alpha$  gemessen.

## 4.2 Messergebnisse der Leerlaufdrehzahlkennlinienerfassung

Die nachfolgenden Messergebnisse wurden für die in Kapitel 4.1 angeführten Drücke bzw. Fallhöhen und Leitapparatöffnungen aufgezeichnet.

### Messergebnisse der Vorbetrachtung

In Abbildung 4.2 ist die Leerlaufdrehzahl für konst. Druck am Spiraleintritt  $p_1$  (links) bzw. für eine konst. Fallhöhe  $H$  (rechts) in Abhängigkeit der Leitapparatstellung  $\alpha$  zu sehen. Die Leerlaufdrehzahl zeigt sowohl bei konst. Druck als auch bei konst. Fallhöhe ein ähnliches Verhalten. Wie im Vorhinein erwartet, steigt die Drehzahl mit größer werdender Leitapparatöffnung und größerem Druck bzw. größerer Fallhöhe. Ab einer Leitapparatöffnung von ca.  $10^\circ$  nähern sich die Kennlinien einem linearen Verlauf. Der maximale Leerlaufdrehzahl beträgt  $1349 \text{ min}^{-1}$ . Diese wurde bei einer Fallhöhe von  $30 \text{ m}$  und einer Leitapparatstellung von  $35,1^\circ$  gemessen.

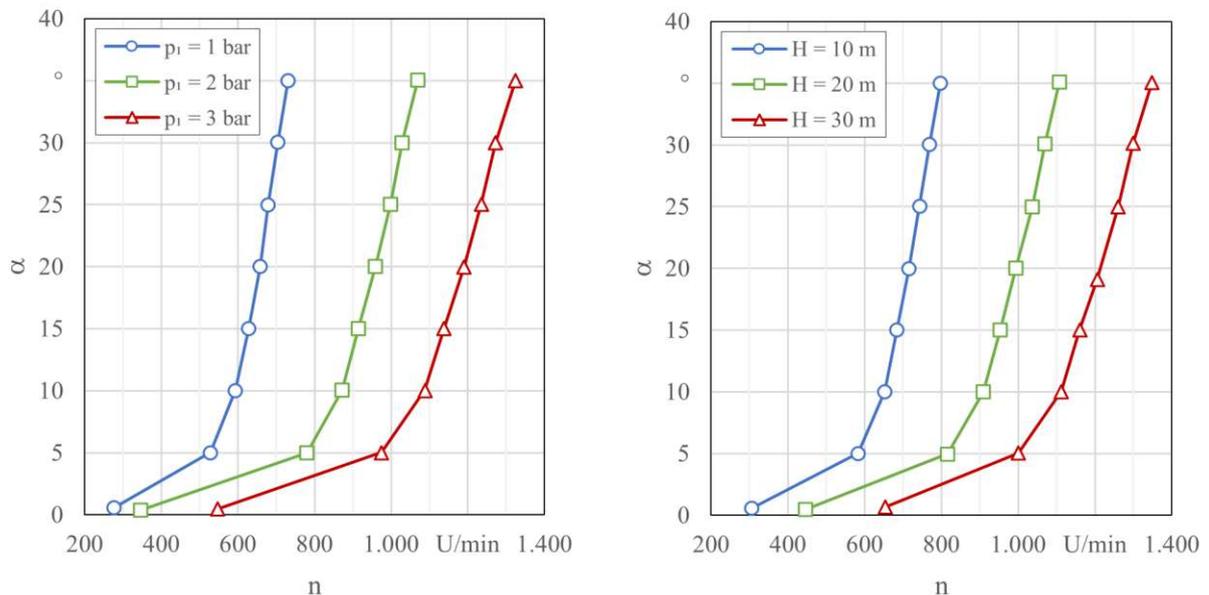


Abbildung 4.2: Vergleich der Leerlaufdrehzahlkennlinien ermittelt für konstanten Druck  $p_1 = [1, 2, 3] \text{ bar}$  (links) und konstanter Fallhöhe  $H = [10, 20, 30] \text{ m}$  (rechts)

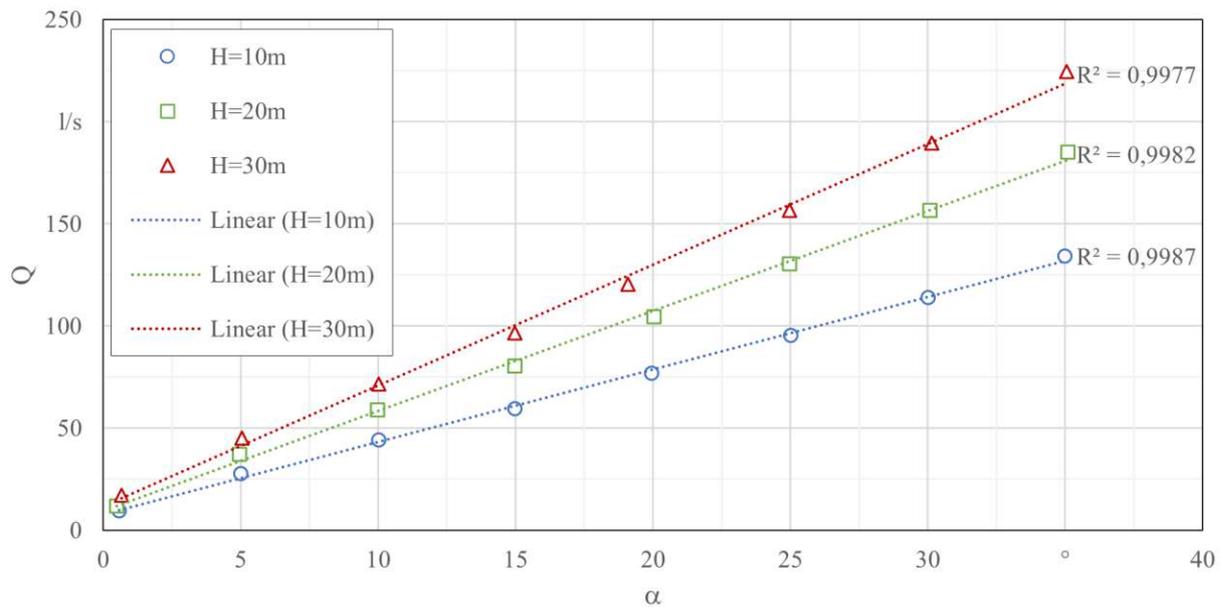


Abbildung 4.3: Verlauf des Durchflusses  $Q$  bei variierter Fallhöhe  $H = [10, 20, 30] m$

### Zusammenhang zwischen Durchfluss und Leitapparatstellung

Aus den Messdaten der Vorbetrachtung wurde des Weiteren der Zusammenhang von Durchfluss  $Q$  und der Leitapparatstellung  $\alpha$  untersucht. Die Messdaten wurden bei konstanter Fallhöhen  $H = [10, 20, 30] m$  für unterschiedliche Leitapparatstellungen  $\alpha = [0, 5, \dots 35]^\circ$  aufgenommen. Die Auswertung in Abbildung 4.3 zeigt einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen Durchfluss und Leitapparatstellung. Die Kennlinien weisen einen positiven Offset im Durchfluss auf. Im abgebildeten Diagramm sind neben den Messwerten auch angenäherte lineare Funktionen eingezeichnet. Diese wurden mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate errechnet und sind in Tabelle 4.3 eingetragen.

Tabelle 4.3: Linear angenäherte Funktionen des Durchflusses  $Q$  in  $\frac{l}{s}$  in Abhängigkeit der Leitapparatstellung  $\alpha$  in  $^\circ$

$$H = 10m: \quad Q = 3,5481 \frac{l}{s \cdot ^\circ} \cdot \alpha + 7,8752 \frac{l}{s}$$

$$H = 20m: \quad Q = 4,8978 \frac{l}{s \cdot ^\circ} \cdot \alpha + 9,5452 \frac{l}{s}$$

$$H = 30m: \quad Q = 5,9101 \frac{l}{s \cdot ^\circ} \cdot \alpha + 11,827 \frac{l}{s}$$

## Messergebnisse der Leerlaufdrehzahlkennlinienerfassung

Aufbauend auf den Messergebnissen der Vorbetrachtung erfolgten die Messungen der Leerlaufdrehzahlkennlinien. Aufgenommen wurden diese für die in Tabelle 4.2 angeführten Fallhöhen und Leitapparatstellungen und sind in Abbildung 4.4 zu sehen. Ab einer Leitapparatstellung von ungefähr  $10^\circ$  ist wieder ein annähernd linearer Verlauf der Messergebnisse zu sehen. Aufgrund minimaler Undichtheit des Leitapparats ist die Turbinendrehzahl stets größer Null. Die maximale Drehzahl wurde bei einer Fallhöhe von  $30\text{m}$  und einer Leitapparatstellung von  $35,0^\circ$  gemessen und beträgt  $1363,0\text{min}^{-1}$ . Im Vergleich zur maximalen Drehzahl aus der Vorbetrachtung bedeutet dies eine Abweichung von ca. 1%. Ebenso zeigt sich wieder ein Ansteigen der Leerlaufdrehzahl hin zu größeren Fallhöhen und mit größer werdender Leitapparatöffnung.

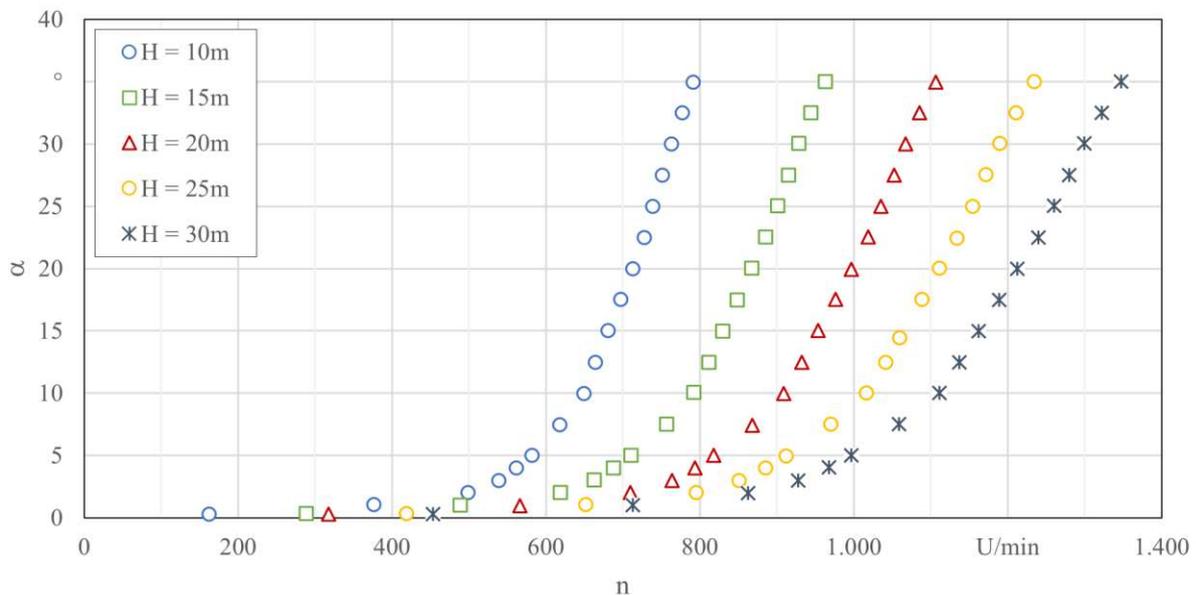


Abbildung 4.4: Messergebnisse der Leerlaufdrehzahlen  $n$  bei unterschiedlichen Leitapparatstellungen  $\alpha$ ; aufgenommen für konstante Fallhöhen  $H = [10, 15, 20, 25, 30]\text{m}$

### 4.3 Erkenntnisse der Leerlaufdrehzahlkennlinienerfassung

Bei der Versuchsplanung wurden  $1400\text{min}^{-1}$  für die Maximaldrehzahl der Durchführungen festgelegt. Um Beschädigungen am Prüfstand zu vermeiden, sollte diese nicht überschritten werden. Die während des Versuchs gemessene maximale Leerlaufdrehzahl der Turbine liegt mit  $1363\text{min}^{-1}$  unter dem kritischen Wert. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Prüfstand für die im Vorfeld gewählten Betriebsparameter, wie beispielsweise eine maximale Fallhöhe von  $H = 30\text{m}$ , im Leerlauf betrieben werden darf. Abbildung 4.5 zeigt den Verlauf der Leerlaufdrehzahl bei vollständig geöffneten Leitapparat in Abhängigkeit der Fallhöhe. Zur Abschätzung der maximalen Leerlaufdrehzahl wurden diese Messwerte durch ein Polynom 2. Grades angenähert.

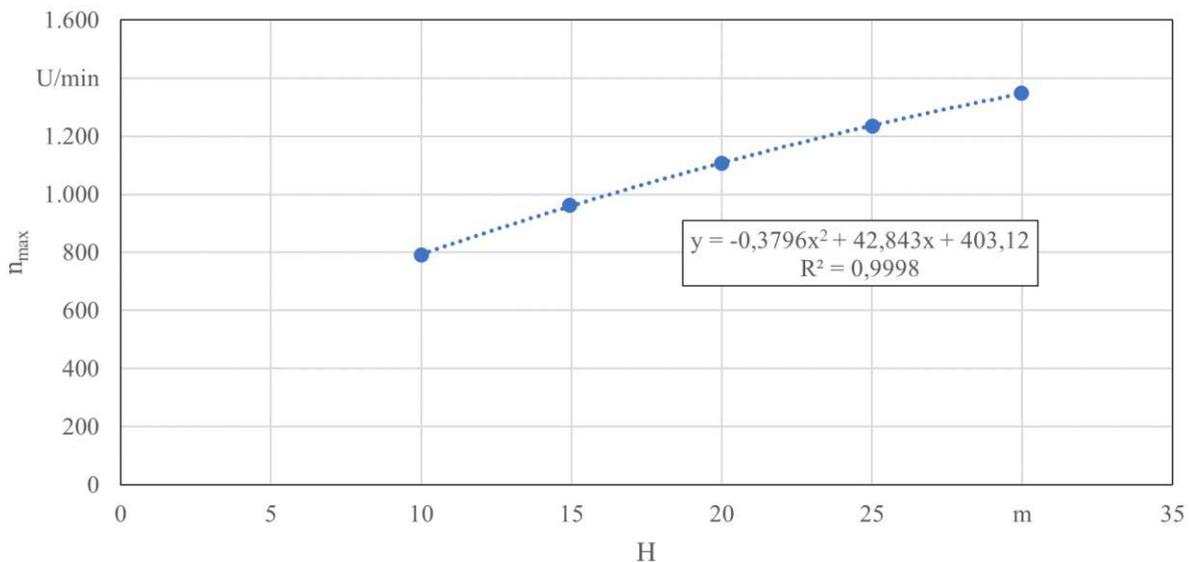


Abbildung 4.5: Verlauf der maximalen Leerlaufdrehzahl für die Fallhöhen  $H = [10, 15, 20, 25, 30] \text{ m}$  mit angenäherter quadratischer Polynomfunktion

Wie während der Messdurchführung festgestellt wurde, ist es nicht möglich, den Leitapparat vollständig zu schließen oder abzudichten. Die minimale erreichbare Öffnung liegt laut Messergebnissen bei ca.  $0,26^\circ$ . Aufgrund dieser Undichtheit stellt sich wiederum ein Mindestdurchfluss ein. Für eine Fallhöhe von  $H = 10\text{m}$  liegt dieser beispielsweise bei  $7,24\text{l/s}$  und sorgt infolgedessen zum Hochdrehen der Maschine. In Abbildung 4.4 zeigt sich dieses Verhalten sehr gut. Hier liegt die minimale Drehzahl für die Kennlinie  $H = 10\text{m}$  bei  $169\text{min}^{-1}$ . Da das automatische Anfahren des Prüfstandes aus dem Stillstand erfolgen soll,

muss diese Erkenntnis in weiterer Folge in die Programmentwicklung miteinfließen. Darin muss sichergestellt werden, dass die Turbine bis zum Startvorgang abgebremst ist.

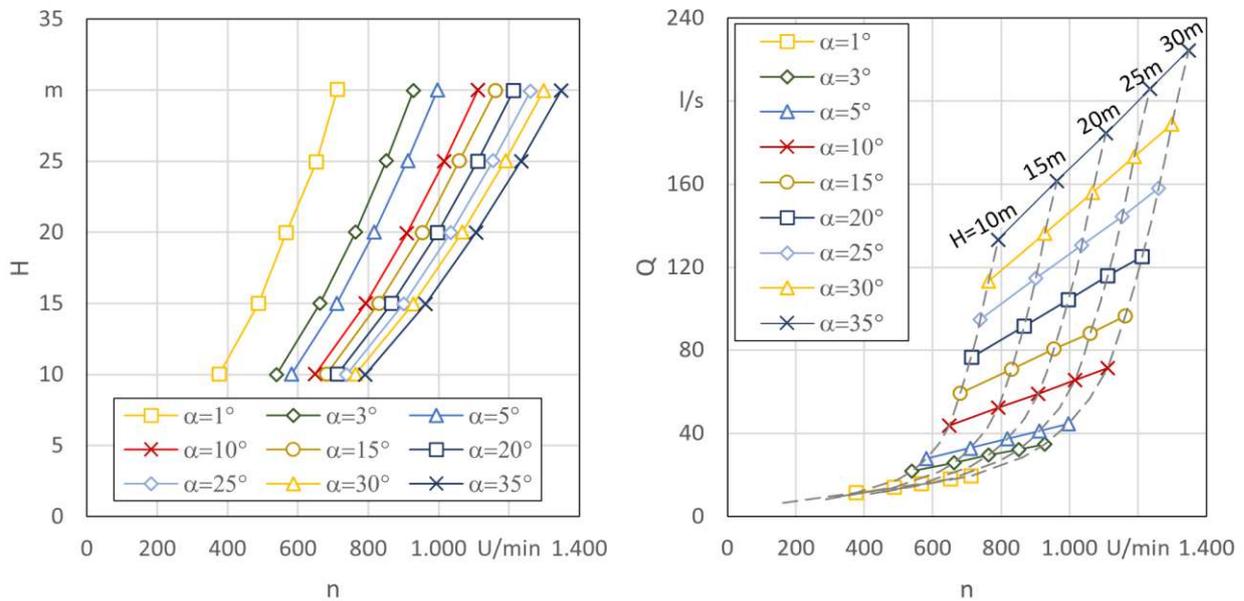


Abbildung 4.6: Einfluss von Fallhöhe  $H$  (links) und Durchfluss  $Q$  (rechts) auf die Turbinendrehzahl  $n_T$ ; ausgewertet für Linien konstanter Leitapparatöffnungen  $\alpha$

Wie die Messauswertung im vorhergehenden Unterkapitel zeigt, wird die Leerlaufdrehzahl maßgebenden von den Parametern Fallhöhe und Leitapparatstellung beeinflusst. Ebenso zeigt sich in Abbildung 4.3, dass Leitapparatstellung und Durchfluss - für konstante Fallhöhen - einen annähernd linearen Zusammenhang besitzen und somit in unmittelbarer Beziehung zueinanderstehen.

Um die Auswirkung dieser Einflussgrößen näher zu betrachten, wurde in Abbildung 4.6 der Zusammenhang zwischen Fallhöhe und Drehzahl (links) bzw. zwischen Durchfluss und Drehzahl (rechts) grafisch dargestellt. Diese Diagramme sind im Anhang A.1 in vergrößerter Darstellung zu finden. Die Messwerte sind für konstante Leitapparatstellungen  $\alpha$  dargestellt. Im linken Diagramm zeigt sich gut, dass die Turbinendrehzahl mit größer werdender Fallhöhe steigt. Somit deckt sich das gezeigte Verhalten mit den Erwartungen aus Kapitel 2, dass mit zunehmender Fallhöhe der Durchfluss und somit die Drehzahl steigen muss. Im rechten Diagramm ist der Zusammenhang zwischen Durchfluss und Drehzahl aufgetragen. Die farbigen Linien stehen für gleiche Leitapparatöffnung und die grau strichlierten Linien zeigen die Messwerte bei konstanter Fallhöhe. Es zeigt sich auch hier, dass die Turbinendrehzahl steigt und mit größer werdender Fallhöhe der Durchfluss ebenso zunimmt. Somit besitzt jede gemessene Leerlaufdrehzahl einen definierten Betriebspunkt, der durch Fallhöhe und Durchfluss bzw. Leitapparatstellung gegeben ist.

Ein weiterer und auch wichtiger Unterpunkt ist die Aufbereitung der Messdaten für die im nächsten Kapitel folgende Entwicklung der Anfahrautomatik. Dazu wurde mit Abbildung 4.7 eine alternative Darstellung der Messdaten erstellt. Diese dient dazu, um die Leerlaufdrehzahl als Funktion der Fallhöhe für konstante Leitapparatöffnung darzustellen. Die angenäherten Polynomfunktionen werden als Ausgangspunkt für die Erstellung der Leerlaufdrehzahlfunktionen verwendet, welche in Kapitel 5 als wesentlicher Baustein der Anfahrautomatik dienen. Eine tabellarische Auflistung der Funktionen ist in Tabelle 4.4 zu finden.

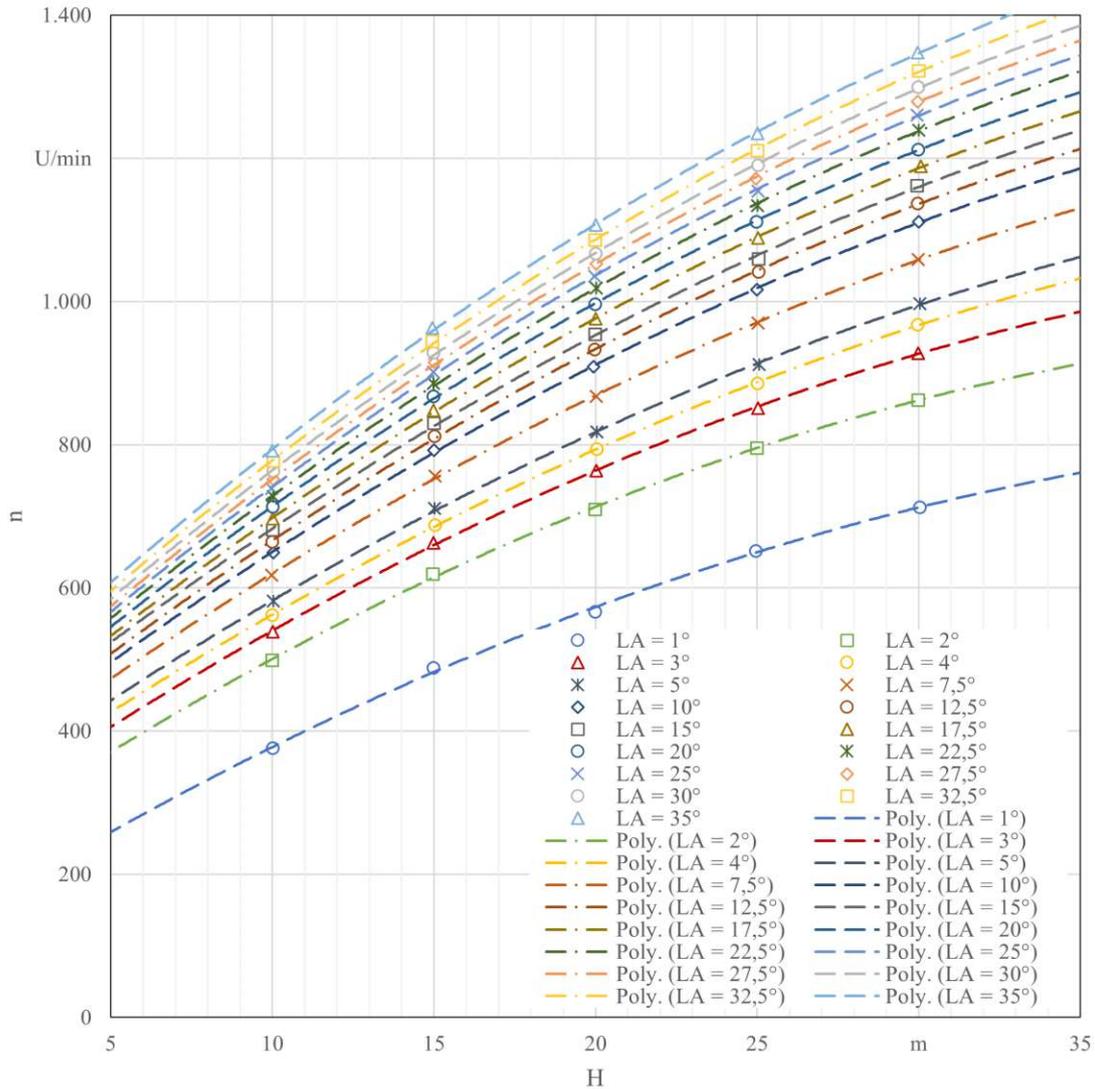


Abbildung 4.7: Weitere Darstellung der Messergebnisse der Leerlaufdrehzahlen: Zusammenhang zwischen Leerlaufdrehzahl und Fallhöhe für unterschiedliche Leitapparatstellungen mit angenäherten Polynomfunktionen 2. Grades

Tabelle 4.4: Koeffizienten der Leerlaufdrehzahlfunktionen in Abhängigkeit der Fallhöhe für Funktionen konstanter Leitapparatstellungen

$\alpha$ in °	c1	c2	c3
1,0	-2,811E-01	2,798E+01	1,260E+02
2,0	-3,169E-01	3,075E+01	2,249E+02
3,0	-3,043E-01	3,151E+01	2,556E+02
4,0	-2,839E-01	3,156E+01	2,756E+02
5,0	-2,893E-01	3,221E+01	2,891E+02
7,5	-2,978E-01	3,382E+01	3,116E+02
10,0	-3,145E-01	3,558E+01	3,258E+02
12,5	-3,253E-01	3,652E+01	3,336E+02
15,0	-3,166E-01	3,653E+01	3,492E+02
17,5	-3,428E-01	3,814E+01	3,508E+02
20,0	-3,502E-01	3,890E+01	3,599E+02
22,5	-3,506E-01	3,949E+01	3,689E+02
25,0	-3,606E-01	4,035E+01	3,738E+02
27,5	-3,692E-01	4,112E+01	3,777E+02
30,0	-3,676E-01	4,140E+01	3,870E+02
32,5	-3,725E-01	4,203E+01	3,952E+02
35,0	-3,796E-01	4,284E+01	4,031E+02

$$n = c1 \cdot H^2 + c2 \cdot H + c3 \cdot H; H \text{ in } m$$

# 5 Programmierung der Anfahrautomatik

Das Hauptprogramm zur Erfassung und Visualisierung der Messdaten, sowie zur Steuerung des Prüfstandes, baut im Wesentlichen auf das im Zuge einer Dissertation [20] erstellte Messprogramm auf. Die Programmierung erfolgte im grafischen Programmiersystem LabVIEW 2016. Darauf aufbauend wurde in der vorliegenden Arbeit eine Anfahrautomatik zur Abbildung von Anfahrzyklen entwickelt und in das bestehende System integriert. Als Anfahrzyklus versteht sich der Betriebsbereich zwischen dem Stillstand der Maschine und dem Erreichen einer vorgegeben Turbinendrehzahl im lastfreien Fall. Die Messdatenerfassung erfolgt parallel dazu.

## 5.1 Bestehendes Mess- und Steuerungsprogramm

Abbildung 5.1 zeigt die Benutzeroberfläche des aktuellen Mess- und Steuerungsprogramms in LabVIEW ohne der implementierten Anfahrautomatik. Im Zentrum der Oberfläche ist ein CAD-Ausschnitt (1) der Modellmaschine zu sehen. Dieser beginnt mit der Zulaufstrecke vom Oberwasser und endet nach dem Saugrohr. Die relevanten Versuchsstanddaten sind übersichtlich an ihren jeweiligen Mess- bzw. Wirkorten dargestellt und werden über dem CAD-Ausschnitt zusätzlich in tabellarischer Form (2) aufgelistet. Im oberen Bereich (3) werden die Aktualisierungsrate und die Messdauer, sowie die eingestellten Abtastfrequenzen des NI cDAQ-9188 und des QunatumX Messverstärkers angezeigt. Diese können im Initialisierungsfenster eingestellt werden, welches durch Anklicken der Schaltfläche *Initialisieren* (7) geöffnet werden kann. Mittels der Schaltfläche *AD-Wandlung starten* (8) werden die aktuellen Messwerte von den beiden Messsystemen übermittelt und können über den Button *Messwerte aufzeichnen* (9) über die gewählte Mittelungszeit aufgezeichnet werden. Zusätzlich erfolgt die Protokollierung der errechneten Kennwerte. Im unteren Bildbereich sind drei

Steuerblöcke zu sehen. Diese sind in LabVIEW als sogenannte Cluster umgesetzt und dienen zur Steuerung der Versorgungspumpe (4), des Motorgenerator der Modellmaschine (5) und der Leitapparatverstellung (6). Mittels den Cluster-Bausteinen können Daten unterschiedlichen Typs in Gruppen zusammengefasst und als Anzeige- oder Bedienelement in Form eines Arrays verstanden werden. Als Beispiel soll der Cluster Versorgungspumpe betrachtet werden. Die Variable *FU Freigabe* ist vom Datentyp Boolean und kann den Wert TRUE oder FALSE annehmen. Die Variable *Drehzahl* ist hingegen vom Typ double und kann einen beliebigen Zahlenwert annehmen. Mittels dem Cluster-Befehl können somit Variablen unterschiedlichen Datentyps gebündelt werden.

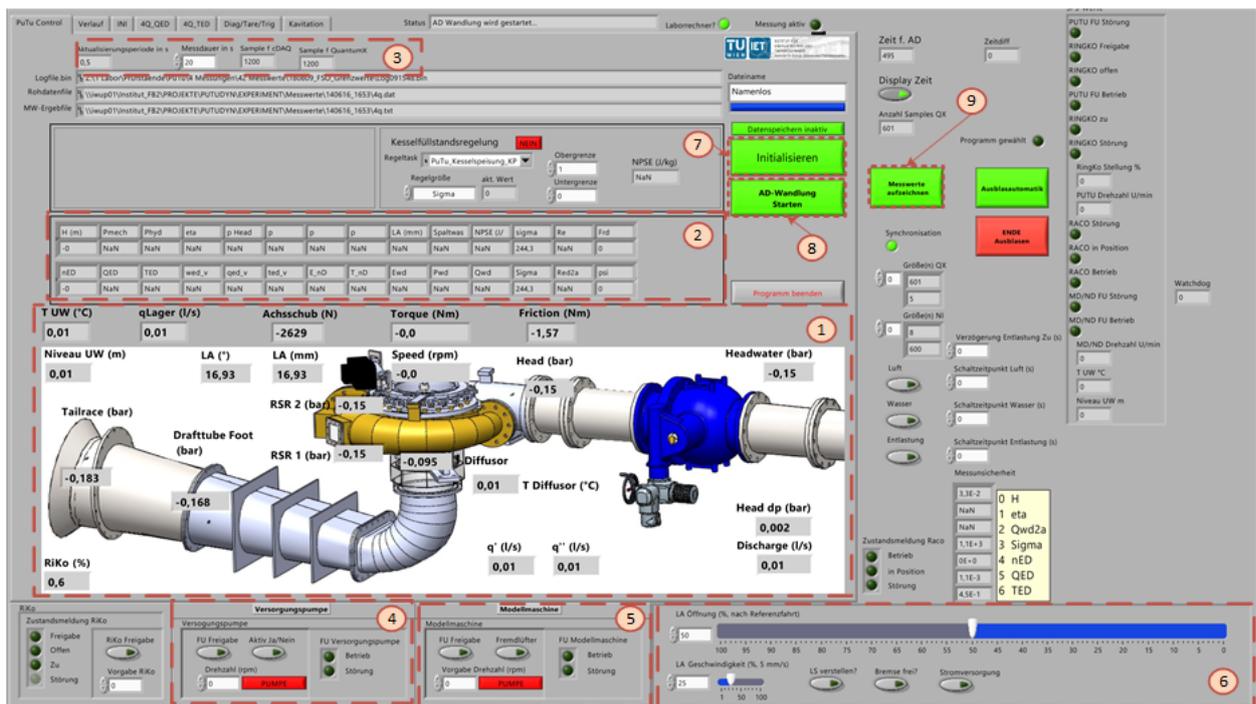


Abbildung 5.1: Benutzeroberfläche des aktuellen Mess- und Steuerungsprogramm ohne Implementierung der Anfahrautomatik

In Abbildung 5.2 ist der Programmablauf vom Initialisieren bis zur Messdatenaufzeichnung und Speicherung skizziert. Im Folgenden wird diese Struktur von Außen nach Innen beschrieben.

Mit Programmstart gelangt man in die erste While-Schleife (While-Loop 1), wo zunächst Standardparameter initialisiert werden und welche so lange aktiv ist, bis das Programm beendet wird. Eine Ebene darunter befindet sich eine Kontrollstruktur (Case-Structure), deren Ereignis von den Kontrollflächen *Initialisieren* und *AD-Wandlung starten* abhängig ist. Wird keine dieser Schaltflächen betätigt, so aktualisiert die darüberliegende While-Schleife im 35ms-Takt und wartet auf ein Kommando. Durch Anklicken des Buttons *Initialisieren*

gelangt man in den gleichnamigen Case und in der Programmoberfläche öffnet sich ein separates Initialisierungsfenster in dem u. a. der Speicherpfad, die Aktualisierungsperiode  $dt$  der darunterliegenden While-Schleife (While-Loop 2) und die Messdauer  $t_{MW}$  über die die Mittelwertbildung erfolgen soll, definiert. Nach erfolgreicher Initialisierung können vom Programm weitere Anweisungen ausgeführt werden. Das Betätigen der Schaltfläche *AD-Wandlung starten* setzt den gleichnamigen Case aktiv und gelangt in der Programmstruktur eine Ebene tiefer. In dieser wird eine weitere While-Schleife (While-Loop 2) ausgeführt, welche mit der definierten Aktualisierungsperiode  $dt$  aktualisiert wird. Ab diesem Zeitpunkt existiert eine Verbindung zum Messsystem und die Messwerte werden nach Ablauf jeder Periode aktualisiert. In dieser Ebene befindet sich eine zweite Case-Structure (Messwerte aufzeichnen), deren Zustände durch die Schaltfläche *Messwerte aufzeichnen* gesteuert werden. Ist der Zustand auf False, so werden die Messdaten und Kennwerte nach jeder Aktualisierungsperiode aktualisiert und angezeigt. Sollen nun Messwerte aufgezeichnet und als Mittelwerte über die Messdauer  $t_{MW}$  berechnet sowie gespeichert werden, muss der Case den Zustand True einnehmen. Durch Betätigen der Schaltfläche *Messwerte aufzeichnen* wird eine For-Schleife gestartet, deren Arbeitstakt durch die Aktualisierungsperiode  $dt$  von der While-Loop 2 vorgegeben wird. Die For-Schleife muss N-mal durchlaufen werden, bis die Anzahl der Aktualisierungsperioden der Messdauer der Mittelwertbildung entspricht. Die aktuellen Messwerte werden nach jeder Schleifendurchgang in ein Array gespeichert und erst nach Ablauf der For-Schleife abgespeichert. Aufgrund der vorliegenden Programmstruktur des bereits existierenden Mess- und Steuerungsprogramm, kann während der Messwertaufzeichnung, also innerhalb der For-Schleife nicht auf die aktuellen Messdaten bzw. Kennwerte zugegriffen werden.

## 5.2 Erstellung der Funktionen zu den Leerlaufdrehzahlkennlinien

In diesem Abschnitt wird die Vorgehensweise bei der Erstellung der sogenannten Leerlaufdrehzahlfunktionen beschrieben. Diese sind im Mess- und Steuerungsprogramm, das im Zuge dieser Arbeit programmiert wurde, hinterlegt. Durch sie wird ein Zusammenhang zwischen Turbinendrehzahl, Fallhöhe und Leitapparatstellung hergestellt. Zu Beginn des Anfahrzyklus muss vom Operator der gewünschte Betriebspunkt durch Vorgabe der Sollturbinendrehzahl  $n_{T,Soll}$ , sowie der Sollfallhöhe  $H_{Soll}$  definiert werden. Anhand dieser Parameter wird die benötigte Leitapparatstellung  $\alpha$  berechnet, um bei der vorgegeben Fallhöhe die gewünschte Turbinendrehzahl zu erreichen. Dafür wurden Leerlaufdrehzahlfunktionen für konstante Fall-

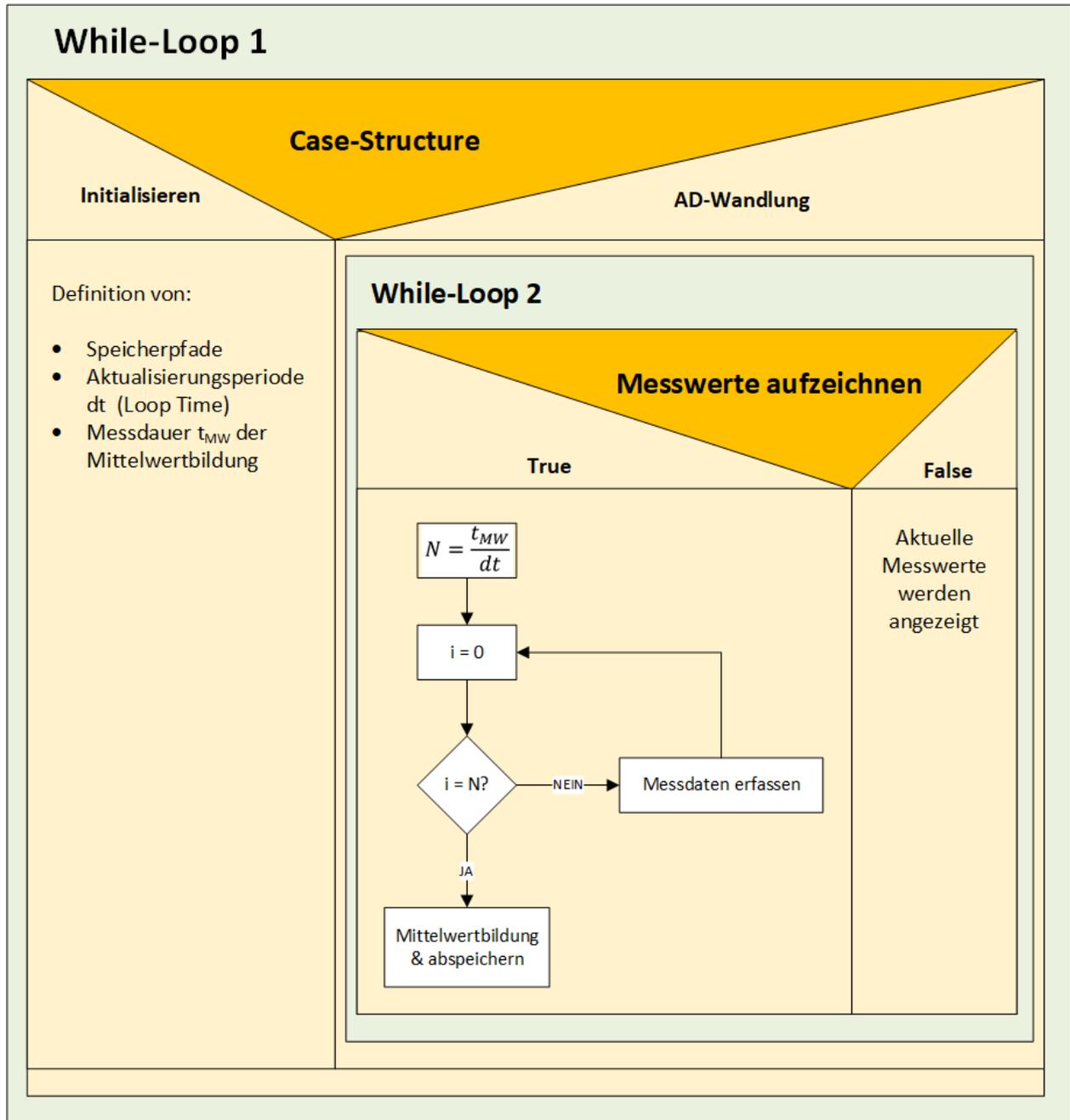


Abbildung 5.2: Skizzierter Programmablaufplan des aktuellen Mess- und Steuerungsprogramms; Ablauf von Programmstart bis zur Datenerfassung

höhen zwischen 10 und 30 m, in Schritten von einem Meter erstellt.

Die Vorgehensweise gliedert sich im Wesentlichen in folgende Abschnitte:

- Berechnung von Polynomfunktionen 2. Grades mittels Methode der kleinsten Quadrate (least-square) aus den aufgenommenen Messpunkten ( $n_T$  bei  $H$  und  $\alpha$ ; siehe Abbildung 4.7 und Tabelle 4.4) in der Form

$$n_T = f(\alpha, H) \quad (5.1)$$

- Berechnung der Turbinendrehzahl aus Gleichung 5.1 für folgenden Datenraster

– Fallhöhen  $H = 10, 11, 12, 13, 14, 15, \dots, 30 \text{ m}$

– Leitapparatstellungen  $\alpha = 2, 3, 4, 5, 7,5, 10, 12,5 \dots, 35^\circ$

- Bestimmung von Polynomfunktionen 5. Grades aus den errechneten Turbinendrehzahlen mittels Methode der kleinsten Quadrate in der Form

$$\alpha = f(n_T, H),$$

mit

$$[n_T] = \text{min}^{-1}, \quad [H] = \text{m},$$

$$\mathbf{D}_f = \{n_T \in \mathbf{R} : 500 < n_T < 1346; H \in \mathbf{Z} : 10 < H < 30\}. \quad (5.2)$$

Ergänzend wurde der Lösungsbereich für Leitapparatstellungen  $\alpha < 2^\circ$  durch Polynomfunktionen 2. Grades erweitert. Diese Funktionen wurden mit den Datenpunkten, ermittelt mit Gleichung 5.1, für Leitapparatstellung zwischen  $0^\circ$  und  $2^\circ$  berechnet. Für Turbinendrehzahlen größer  $n_T = f(\alpha = 2^\circ, H)$  wird Gleichung 5.2 zur Berechnung von  $\alpha$  verwendet. Die daraus resultierenden Kennlinien sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

Das in Abbildung 5.3 dargestellte Kennlinienfeld ist im Mess- und Steuerungsprogramm in Form von Funktionen für Fallhöhen zwischen 10 m und 30 m, in einer Auflösung von einem Meter, hinterlegt. Jede Kennlinie beschreibt den Verlauf der Turbinendrehzahl im Leerlauf, abhängig von der Leitapparatstellung, für eine fixe Fallhöhe. Der Übergang von Polynomfunktionen 2. Ordnung auf Funktionen 5. Ordnung bei  $\alpha = 2^\circ$  ist in Abbildung

deutlich zu erkennen.

Die Auswertung der Daten, sowie die Berechnung der Näherungsfunktionen, erfolgte mithilfe der Software MATLAB mit der Funktion  $\text{polyfit}(x, y, n)$ . Diese arbeitet nach der Methode der kleinsten Quadrate und gibt die Koeffizienten eines Polynoms  $p(x)$  von Grad  $n$  zurück, sodass die Fehlerabweichung der Ausgleichsfunktion zu den  $y$ -Daten minimiert ist.

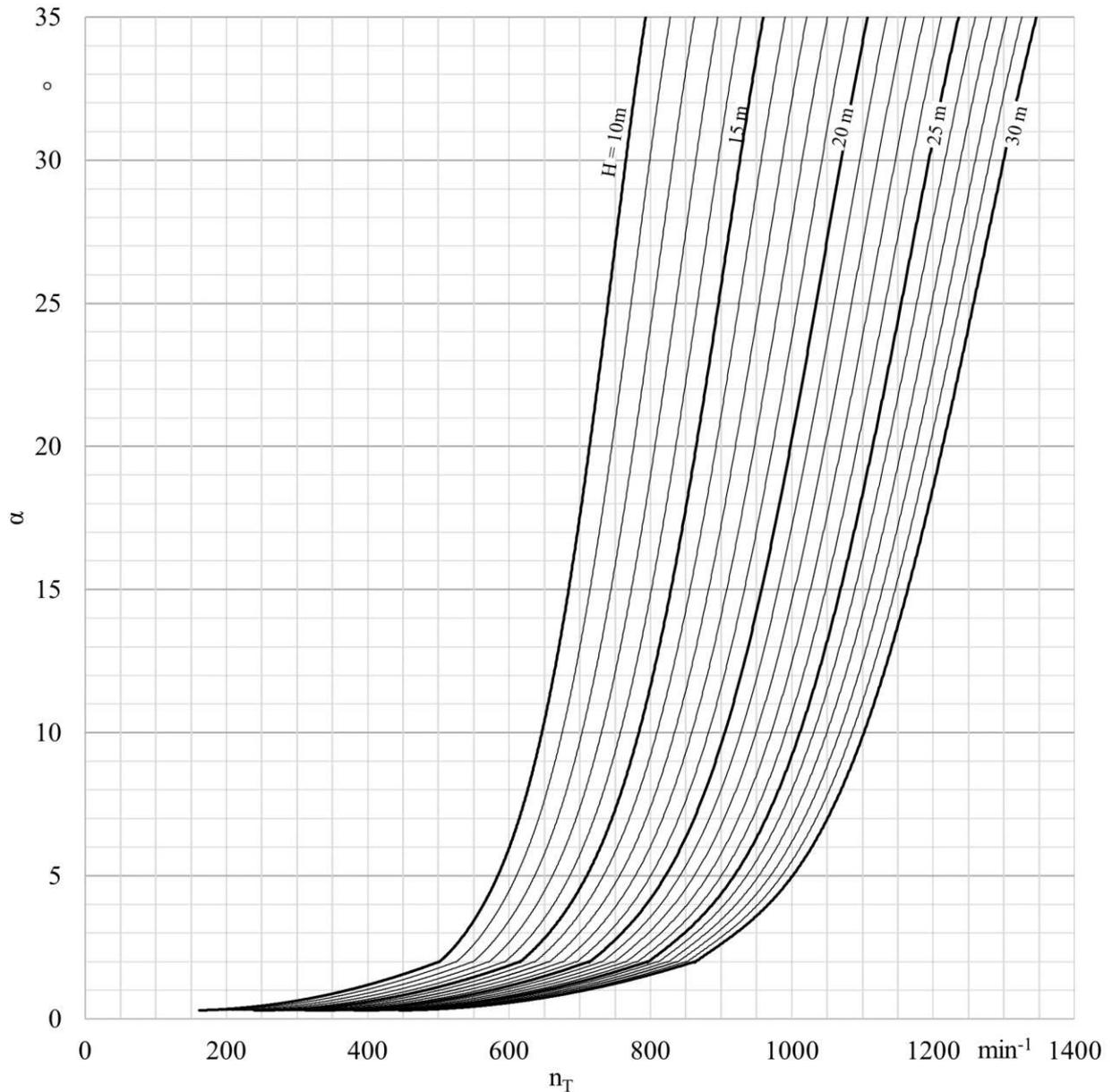


Abbildung 5.3: Kennlinienfeld basierend auf den Ergebnissen aus Gleichung 5.2 mit Kennlinien für konst. Fallhöhen; auf der Abszissenachse ist die Turbinendrehzahl  $n_T$  in  $\text{min}^{-1}$  und auf der Ordinatenachse die Leitapparatstellung  $\alpha$  in  $^\circ$  aufgetragen.

## 5.3 Essentielle Vorbetrachtungen

Die programmtechnische Implementierung der Anfahrautomatik in das bereits existierende System bzw. Steuerungsprogramm erfordert wesentliche Vorüberlegungen bezüglich der programmtechnischen Umsetzung.

Die Linearantriebsansteuerung erfolgt über eine SPS, welche als Sollwert einen Wert zwischen 0 und 100 % vom Steuerungsprogramm als Vorgabe bekommt. Ein Wert von 100 % entspricht der maximalen Leitapparatöffnung von 35°. Die Regelung auf den Sollwert erfolgt dabei direkt über eine integrierte Logik am Linearantrieb. Der IST-Wert wird hingegen über einen Inkrementalgeber (siehe Kapitel 3) aufgenommen, liegt als Gradwert vor und ist ein maßgebender Parameter der ermittelten Leerlaufdrehzahlkennlinien aus Kapitel 4. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wird die Leitschaukelstellung über die Leerlaufdrehzahlfunktionen als Winkelmaß in Grad berechnet. Um diesen als Leitschaukelstellung vorgeben zu können, muss eine Umrechnung in % erfolgen. Dazu wurde die Leitschaukelstellung in Grad für Sollwerte in 5%-Schritten aufgenommen und als Funktion abgebildet. Mit dieser Funktion kann die Umrechnung von Grad zu Prozent erfolgen. Die Messpunkte, sowie die daraus abgeleitete Funktion zur Umrechnung zwischen Grad und Prozent sind in Abbildung 5.4 dargestellt.

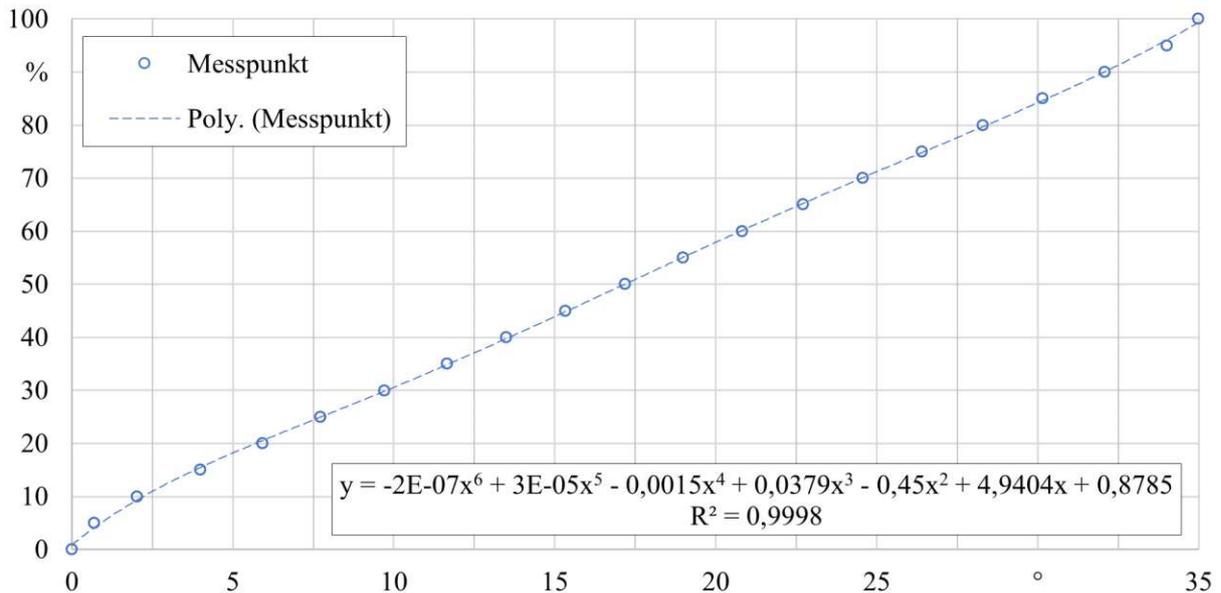


Abbildung 5.4: Zusammenhang zwischen der Leitschaukelstellung  $\alpha$  in % und °; Messpunkte durch Polynom 6. Grades angenähert.

Um einen Anfahrzyklus realitätsnah abbilden zu können, ist der Start aus dem Stillstand von

großer Bedeutung. Aus der Messdurchführung in Kapitel 4 zeigte sich, dass ein gänzlich Schließen und somit Abdichten des Leitapparates nicht möglich ist und das Laufrad jederzeit vom Medium durchströmt wird. Aufgrund der Durchströmung beschleunigt das Laufrad, bis die Turbine eine stationäre Drehzahl erreicht hat. Für Fallhöhen größer gleich  $10m$  liegt diese über  $150min^{-1}$  (vgl. Kapitel 4.2). Um die Randbedingung  $n_T = 0$  zum Start vorgeben zu können, muss die Maschine vor jedem Anfahrvorgang abgebremst werden. Eine triviale Umsetzung in der Programmierung kann durch Vorgabe der Turbinendrehzahl  $n_T = 0$  an den Frequenzumrichter realisiert werden.

## 5.4 Programmierung und Implementierung

### 5.4.1 Informationsfluss / Programmablauf

In Abbildung 5.5 ist der Programmablauf der implementierten Anfahrautomatik dargestellt, dessen Ein- und Ausgänge die Schnittstellen zum bestehenden Mess- und Steuerungsprogramm bilden. Die Eingänge werden im Wesentlichen durch die momentane Turbinendrehzahl  $n_{T,IST}$ , die anliegende Fallhöhe  $H_{IST}$ , die aktuelle Leitapparatposition  $LA_{IST}$ , sowie der Frequenzumrichter-Freigaben für Turbine und Versorgungspumpe gebildet. Mit den Ausgängen werden der Linearantrieb der Leitapparatverstellung, der Frequenzumrichter (FU) des Motorgenerators der Turbine und der Frequenzumrichter der Versorgungspumpe angesteuert.

Vor der Initialisierung und dem Start des Anfahrzyklus müssen vom Bediener folgende Einstellungen getroffen werden:

- Leitapparat schließen
- Fremdlüfter des Motogenerators aktivieren
- FU Freigabe der Turbine aktivieren und Turbinendrehzahl  $n_{T,IST} = 0$  vorgeben
- FU Freigabe der Versorgungspumpe aktivieren und die gewünschte Fallhöhe  $H_{SOLL}$  durch Vorgabe der Versorgungspumpendrehzahl  $n_P$  einstellen

Der Betriebspunkt wird durch Turbinendrehzahl und Fallhöhe definiert und bildet zusam-

men mit der Anfahrzeit den Anfahrzyklus. Im Initialisierungsschritt werden diese Parameter als Sollwerte vorgegeben und anschließend der Programmablauf gestartet. Während des Anfahrprozess werden drei Aufgaben simultan abgearbeitet:

- Die Ansteuerung des Leitapparates durch Vorgabe der Öffnungsgeschwindigkeit
- Die Regelung der Fallhöhe auf einen konstanten Wert über die Drehzahl der Versorgungspumpe
- Die Aufzeichnung der Messwerte und Berechnung der Prozessgrößen

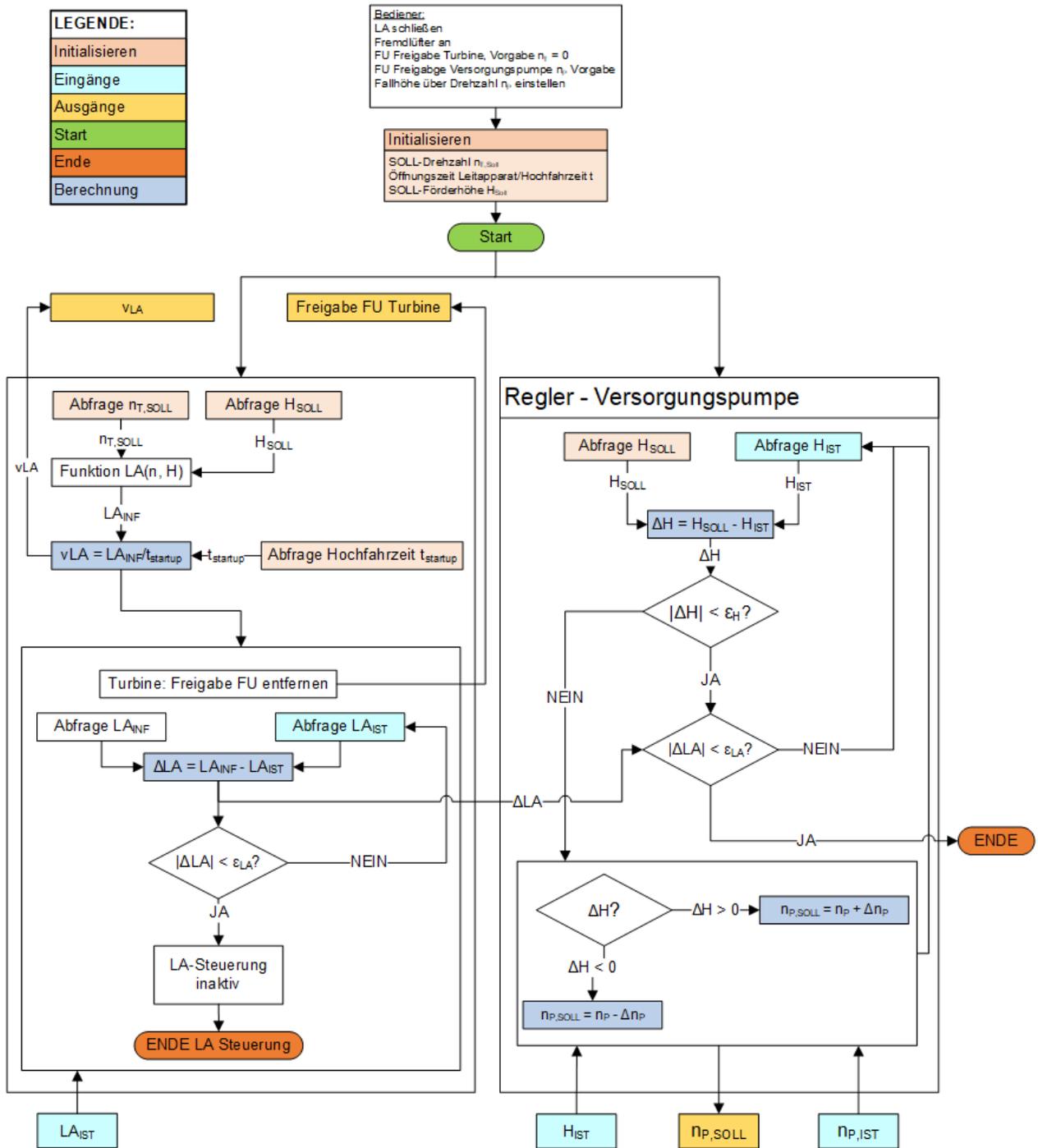


Abbildung 5.5: Programmablaufplan der implementierten Anfahrautomatik

Im Folgenden werden die Programmabschnitte der Leitapparatsteuerung, sowie der Regelung der Fallhöhe näher beschrieben.

## Leitapparatsteuerung

Nach dem Initialisierungsschritt und dem Start der Anfahrautomatik, erfolgt die Abfrage der Sollwerte  $n_{T,SOLL}$  und  $H_{SOLL}$ . Aus diesen Eingangsparametern wird mithilfe der Leerlaufdrehzahlfunktionen eine Leitapparatstellung berechnet, bei der sich die Soll Drehzahl der Turbine bei entsprechender Fallhöhe einstellt. In Abbildung 5.5 ist diese als  $LA_{INF}$  bezeichnet. Anschließend wird die Öffnungsgeschwindigkeit  $v_{LA}$  des Leitapparates berechnet. Theoretisch hängt diese von der maximalen Leitapparatöffnung und der Öffnungszeit bzw. der Anfahrzeit ab. Die Öffnungsgeschwindigkeit wird der externen Leitapparatsteuerung vorgegeben und in weitere Folge die Frequenzumrichterfreigabe des Motorgenerators der Turbine entfernt. Somit ist diese nicht mehr eingebremst und das Laufrad wird durch das durchströmende Wasser beschleunigt. Ab diesem Zeitpunkt wird in jedem Schleifendurchgang die Differenz  $\Delta LA$  zwischen dem Sollwert  $LA_{INF}$  und dem IST-Wert  $LA_{IST}$  berechnet. Wenn diese kleiner einer eingestellten Toleranz  $\epsilon_{LA}$  ist, hat der Leitapparat seine Endposition erreicht und seine Haltebremse wird aktiviert.

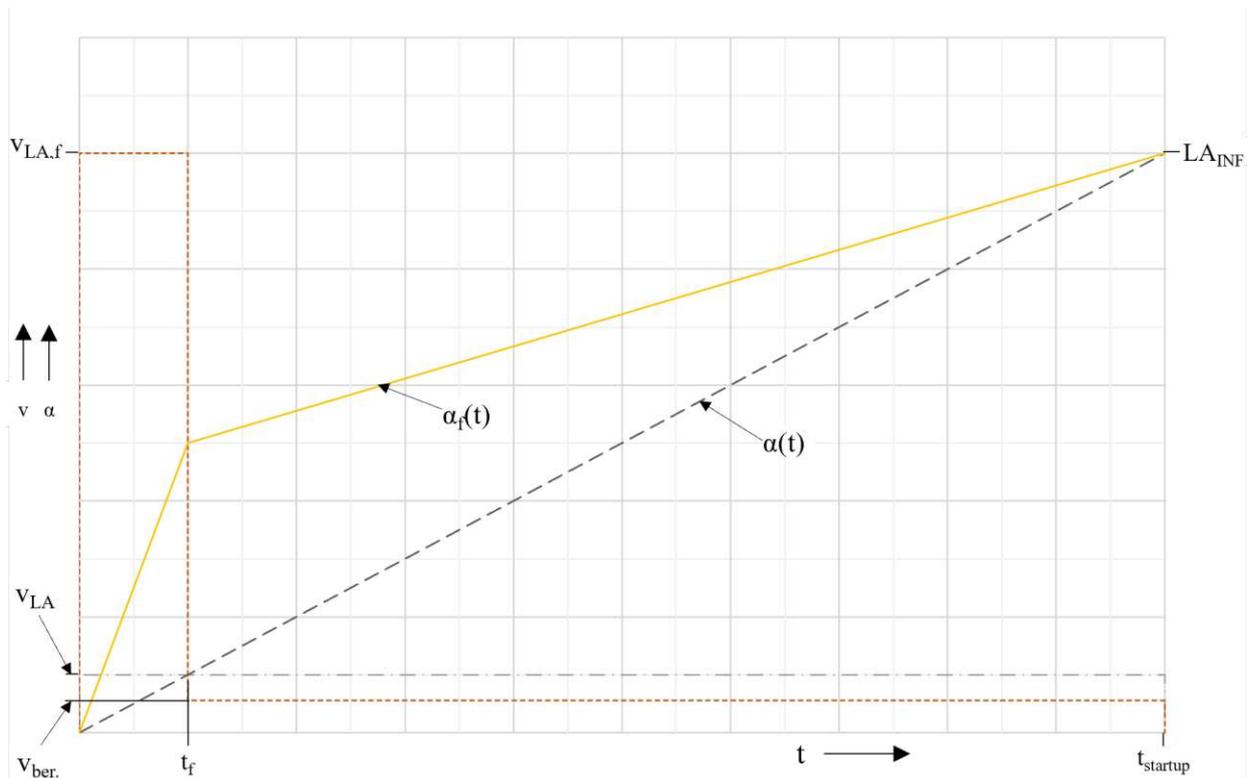


Abbildung 5.6: Leitapparatöffnungsgeschwindigkeit: konstant vs. binär

Neben der Vorgabe einer konstanten Öffnungsgeschwindigkeit  $v_{LA}$  wurde in der Programmierung die Möglichkeit realisiert, eine Öffnungsgeschwindigkeit  $v_{LA,f}$  für eine definierte

Zeit vorzugeben. In Abbildung 5.6 sind die verschiedenen Modi gegenübergestellt. Standardmäßig wird der Leitapparat konstant mit der Geschwindigkeit  $v_{LA}$  geöffnet, bis dieser den Wert  $\alpha = LA_{INF}$  erreicht hat. Wird hingegen eine Öffnungsgeschwindigkeit  $v_{LA,f}$  und eine dementsprechende Zeit  $t_f$ , in der diese Geschwindigkeit gelten soll, vorgegeben, so öffnet der Leitapparat diskontinuierlich. Dies wird durch die Linie  $\alpha_f(t)$  beschrieben. Um den vorgegebenen Wert  $LA_{INF}$  in derselben Zeit wie bei Vorgabe einer konstanten Öffnungsgeschwindigkeit zu erreichen, wird der Leitapparatsteuerung für den Zeitraum von  $t_f$  bis  $t_{startup}$  folgende berechnete Geschwindigkeit vorgegeben:

$$v_{ber.} = \frac{v_{LA} \cdot t_{startup} - v_{LA,f} \cdot t_f}{t_{startup} - t_f}. \quad (5.3)$$

Im Mess- und Steuerungsprogramm ist  $t_f$  indirekt beeinflussbar und wird über die Periodendauer eines Schleifendurchgangs berechnet. Zu diesem Zwecke kann in *LabVIEW* im Control Panel eine Konstante gesetzt werden. Diese gibt an, für wie viele Schleifendurchgänge die Öffnungsgeschwindigkeit  $v_{LA,f}$  vorgegeben werden soll. Die Dauer ergibt sich aus dem Produkt der gesetzten Konstante und der Periodendauer eines Schleifendurchgangs.

### Regelung der Versorgungspumpe

Über die Versorgungspumpe wird die Fallhöhe  $H$  geregelt. Noch bei geschlossenem Leitapparat und eingebremster Turbine, wird der Versorgungspumpe eine Drehzahl  $n_P$  vorgegeben, sodass sich eine Druckdifferenz  $\Delta p_{12}$  zwischen Leitapparateintritt und Saugrohr Austritt (siehe Kapitel 3, Gleichung 3.2) einstellt, welche der vorgegebenen Fallhöhe  $H_{SOLL}$  entspricht. Ab dem Start der Anfahrautomatik wird in jedem Schleifendurchgang die Höhendifferenz  $\Delta H$  zwischen der vorgegebenen Soll-Fallhöhe  $H_{SOLL}$  und der momentanen, aus den Betriebsparametern berechneten, Ist-Fallhöhe  $H_{IST}$  berechnet. Zeitgleich öffnen die Leitschaufeln und die vom Wasser durchströmte Fläche nimmt zu. Daraus folgt eine Änderung der Anlagenkennlinie. Diese flacht zu größeren Durchflüssen  $Q$  ab. Soll nun eine konstante Fallhöhe  $H$  eingehalten werden, so muss die Pumpenkennlinie dementsprechend verändert werden, sodass sich ein Schnittpunkt der momentanen Anlagenkennlinie mit der konstanten Soll-Fallhöhe als gewünschter Betriebspunkt einstellt. Dies geschieht durch Vorgabe einer angepassten Pumpendrehzahl  $n_{P,SOLL}$  solange, bis die Höhendifferenz  $\Delta H$  kleiner dem Abbruchkriterium  $\varepsilon_H$  ist. Bei Höhendifferenzen  $\Delta H < 0$  wird die Pumpenkennlinie durch Reduktion der Versorgungspumpendrehzahl  $n_P$  an den Betriebspunkt angepasst. Äquivalent dazu erfolgt die

Anpassung bei Differenzen  $\Delta H > 0$  durch Erhöhung der Pumpendrehzahl.

Der Programmablauf endet mit dem Erreichen eines stationären Zustandes, d.h. sobald die Abbruchkriterien  $\Delta LA < \epsilon_{LA}$  und  $\Delta H < \epsilon_H$  erfüllt sind.

Die Ansteuerung der Versorgungspumpe erfolgt über eine speicherprogrammierbare Steuerung, welche die Sollwertänderung aus dem Mess- und Steuerungsprogramm erhält. In dieser sind Sollwerte für die An- bzw. Ablauframpen der Versorgungspumpe, sogenannte An- bzw. Abstiegsfunktionen, hinterlegt. Diese geben an, um welchen Betrag die Drehzahl pro Sekunde erhöht bzw. vermindert werden. Aus Gründen der Sicherheit können die Rampenwerte nicht über *LabVIEW* verändert werden.

### 5.4.2 Grafische Benutzeroberfläche

Dem Anwender stehen in der grafischen Benutzeroberfläche in LabVIEW drei Registerblätter mit definierbaren Parametern und Steuerungsbefehlen zur Verfügung. Diese sind in Abbildung 5.7 zu sehen.

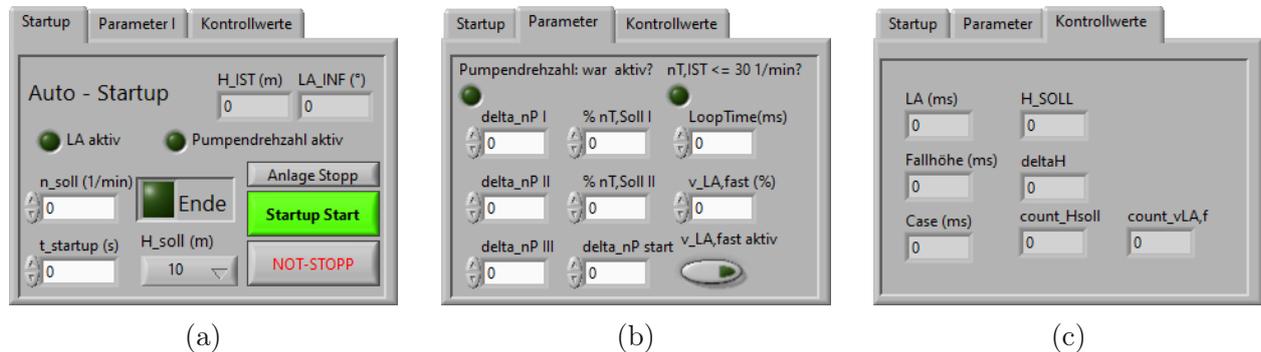


Abbildung 5.7: Benutzeroberfläche der implementierten Anfahrautomatik

#### Registerblatt Startup (a)

Im ersten Registerblatt **Startup** (a) werden die Soll-Turbinendrehzahl  $n_{T,SOLL}$ , die Soll-Fallhöhe  $H_{SOLL}$  und die Zykluszeit  $t_{startup}$  definiert. Die Klammerausdrücke geben die jeweiligen Einheiten der einzugebenden Parameter an. Mittels *Startup Start* wird der Zyklus gestartet und nach Erreichen des stationären Betriebspunkts kann der Prüfstand über den Befehl *Anlage Stopp* zum Stillstand gebracht werden. Dabei wird der Leitapparat automatisch geschlossen und die FU-Freigabe der Versorgungspumpe entfernt. Nach Unterschreiten

der Turbinendrehzahl  $n_T < 30\text{min}^{-1}$  wird dem Frequenzumrichter des Motorgenerators die Drehzahl  $n = 0$  vorgegeben. Dieser Zustand entspricht dem Ausgangspunkt vor dem Start des Programmablaufs. Über die Kontrollleuchten *LA aktiv* und *Pumpendrehzahl aktiv* wird angezeigt, ob die Programabschnitte der Leitapparatsteuerung und der Versorgungspumpenregelung aktiv sind. Die Kontrollleuchte *Ende* wird nach Erreichen des stationären Betriebspunkt aktiv gesetzt. Weiters werden die Ist-Fallhöhe  $H_{IST}$  und die Leitapparatendposition  $LA_{INF}$  angezeigt.

### Registerblatt Parameter (b)

Im Registerblatt **Parameter** (b) müssen in der Initialisierungsphase alle Parameter definiert werden. Mit den Parametern  $dn_{P,I}$  bis  $dn_{P,III}$  wird das Inkrement definiert, mit welchem die Drehzahl der Versorgungspumpe pro Schleifendurchgang (Iterationsschritt) erhöht bzw. vermindert wird. Im ersten Schleifendurchgang wird die Pumpendrehzahl um den Wert von  $dn_{Pstart}$  erhöht. Um welches Inkrement die Pumpendrehzahl geändert wird, wird durch die Parameter  $\%n_{T,Soll,I}$  und  $\%n_{T,Soll,II}$  definiert. Die Gültigkeitsgrenzen werden als Prozentwert der Soll-Turbinendrehzahl angegeben. Die in Abbildung 5.8 dargestellt Grafik soll den Zusammenhang der vorgestellten Parameter veranschaulichen. Die (rot) strichlierte Linie stellt die Soll-Turbinendrehzahl dar. Diese wird dem Prüfstand mit dem Starten des Anfahrzyklus über die Leitapparatendstellung vorgegeben. Der Verlauf der tatsächlichen Turbinendrehzahl  $n_{T,Ist}$ , dargestellt als (gelbe) durchgezogene Linie, wird über die frei wählbaren Parameter  $dn_P$  und  $\%n_{T,Soll}$  beeinflusst.

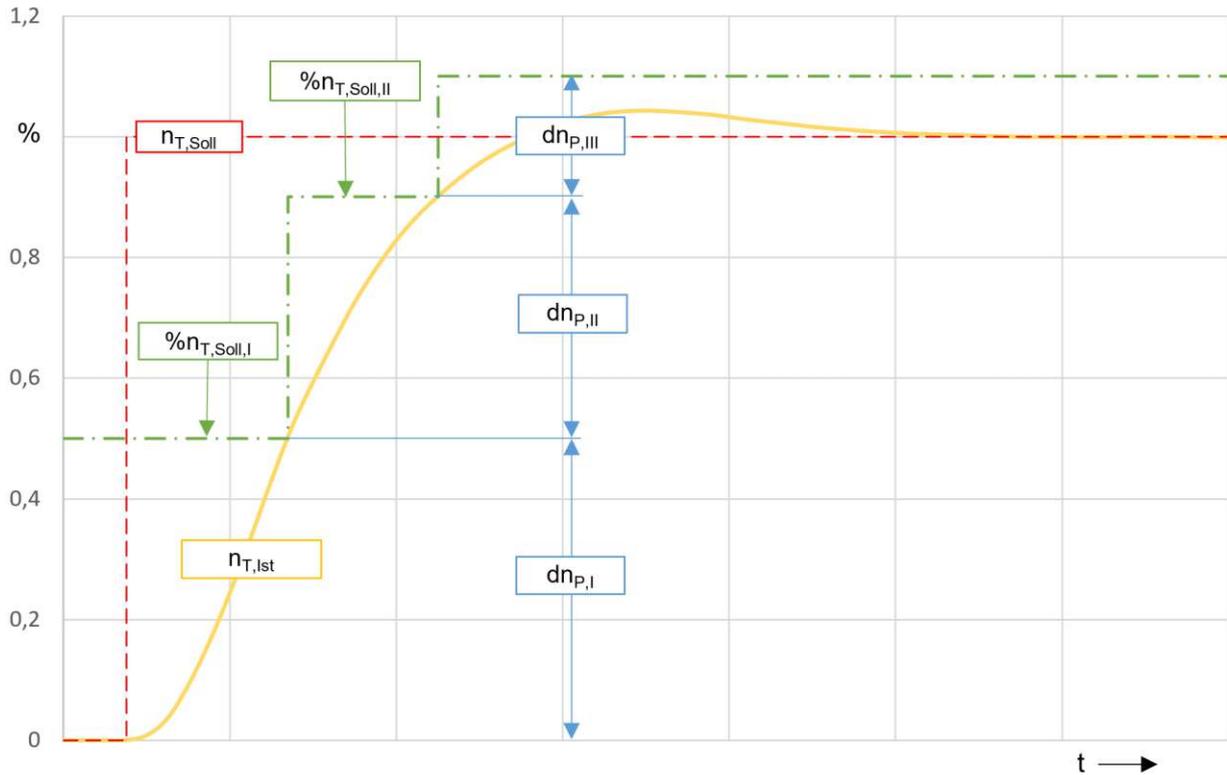


Abbildung 5.8: Grafische Darstellung der variierbaren Parameter

Die Dauer eines einzelnen Schleifendurchgangs wird durch den Parameter *LoopTime* gesteuert, welche standardmäßig auf einen Minimaltakt von 251 ms pro Durchgang eingestellt ist. Die in Kapitel 5.4.1 beschriebenen optionalen Funktion der diskontinuierlichen Leitapparattöffnung kann über die Schaltfläche *v\_LA fast aktiv* aktiviert werden. Die Öffnungsgeschwindigkeit  $v_{LA,f}$  wird als Prozentwert der maximal möglichen Leitapparatverstellgeschwindigkeit durch den Parameter  $v_{LA,fast}$  definiert.

### Registerblatt Kontrollwerte (c)

Registerblatt **Kontrollwerte** (c) dient ausschließlich der Visualisierung programminterner Laufzeiten bzw. Rechenwerte. Die Steuerung des Leitapparats bzw. die Regelung der Versorgungspumpe werden in zwei unterschiedlichen, parallel arbeitenden Schleifen ausgeführt. Die Laufzeit dieser Schleifen werden von den Werten *LA (ms)* bzw. *Fallhöhe (ms)* wiedergegeben. *Case (ms)* gibt die Gesamtdauer seit Beginn der AD-Wandlung wieder.

*HSOLL* gibt lediglich die in Registerblatt *Startup* definierte Soll-Fallhöhe und *deltaH* die Differenz zwischen der Ist-Fallhöhe und der Soll-Fallhöhe aus.

Weiters sind zwei Zähler ausgewiesen. Der Zähler *countHsoll* gibt an, in wie vielen aufeinanderfolgenden Schleifendurchgängen die Bedingung  $|\Delta H| < \epsilon_H$  erfüllt ist. Der Zähler *count\_vLA,f* gibt an, für wie viele Iterationen die Funktion *v\_LAfast aktiv* (siehe Registerblatt Parameter) ausgeführt worden ist.

## 5.5 Erkenntnisse der Inbetriebnahme

In Kapitel 3.1.2 wurde bereits auf den Verstellmechanismus des Leitapparats eingegangen. Die Positionsregelung wird von der internen Elektronik des Linearantriebs übernommen und kann nur eingeschränkt via *LabVIEW* beeinflusst werden. Infolgedessen ist die Umsetzung der Leitapparatsteuerung ein zentrales Element in der Programmierung des automatisierten Anfahrvorgangs. In der vorliegenden Arbeit wurden zwei unterschiedliche Ansätze näher untersucht.

Die erste Variante sah ein diskontinuierliches Öffnen des Leitapparats vor, d.h. in jedem Schleifendurchgang wird der Leitapparat-Sollwert um ein definiertes Inkrement  $dLA$  erhöht, bis die Endposition  $LA_{Inf}$  erreicht ist. Dieser Wert berechnet sich wie folgt aus der Leitapparatendstellung  $LA_{INF}$ , der Zykluszeit  $t_{startup}$  und der Periodendauer der zeitgesteuerten Schleife  $t_{loop}$ :

$$dLA = \frac{LA_{INF}}{\frac{t_{startup}}{t_{loop}}} \quad (5.4)$$

Der Bruch im Nenner gibt die Anzahl der Schleifendurchgänge auf Basis der Zykluszeit und der Periodendauer wieder. Daraus lässt sich erkennen, dass für kleiner werdende Werte für die Periodendauer, folglich auch das Inkrement  $dLA$  verringert wird. Bereits erste Implementierungsversuche haben gezeigt, dass der zu diesem Zeitpunkt am Prüfstand verbaute Linearantrieb den erforderlichen minimalen Verstellschritt nicht ausführen kann und das Anforderungsprofil nicht erfüllte. Diese Erkenntnis wurde nach Rücksprache vom Hersteller *RACO* bestätigt. Aus diesem Grund wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt und der Fokus auf eine Variante mit Vorgabe von Verstellgeschwindigkeit und Endwert gelegt. Diese wurde bereits in Kapitel 5.4.1 beschrieben. In Abbildung 5.9 sind die beiden Varianten grafisch veranschaulicht. Links ist der erste und rechts der zweite Ansatz dargestellt.

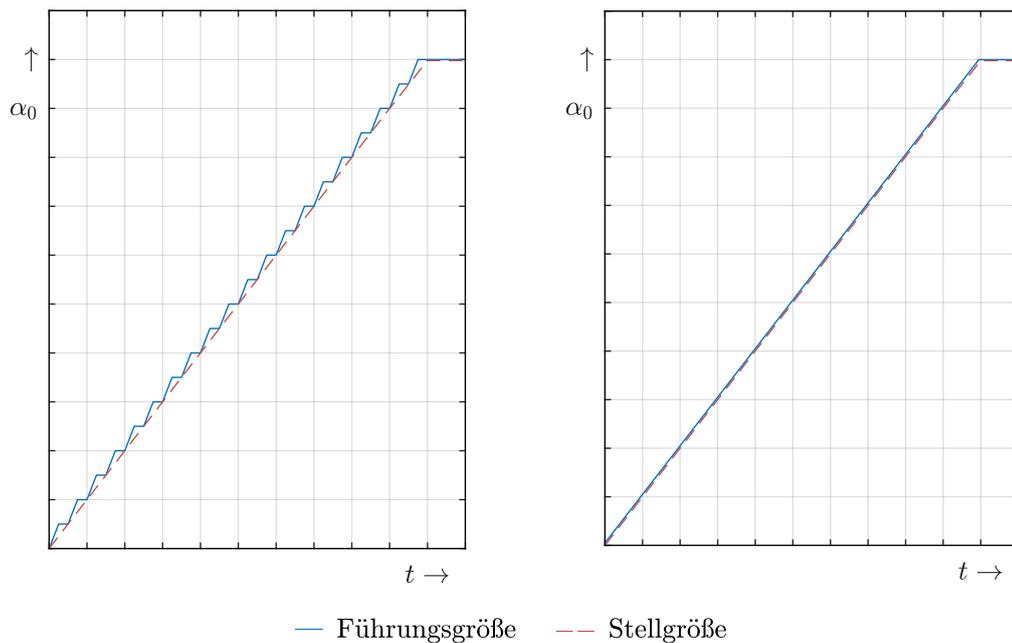


Abbildung 5.9: Qualitative Veranschaulichung der Öffnungscharakteristik des Leitapparates bis Erreichen des Leitapparattendwerts  $\alpha_0$ . Links: Vorgabe einer fixen Schrittweite. Rechts: Vorgabe des Endwerts und der Öffnungsgeschwindigkeit.

Weitere wichtige Erkenntnisse aus der Inbetriebnahme des Programms konnten hinsichtlich der Regelung der Versorgungspumpe gezogen werden. In der Initialisierungsphase wird die Drehzahl der Versorgungspumpe entsprechend der gewünschten Fallhöhe eingestellt. Zu diesem Zeitpunkt sind die Leitapparatschaukeln geschlossen. Werden diese nach dem Start nun geöffnet und das Wasser strömt durch die Maschine, kommt es zu einem abrupten Druckabfall und die Fallhöhe kann dem Sollwert nicht mehr ordnungsgemäß nachgeführt werden. Zu diesem Zweck wurde der Parameter *delta\_nP\_start* eingeführt. Im ersten Schleifendurchgang wird die Pumpendrehzahl um diesen Wert erhöht. In den folgenden Iterationen folgt die Regelung nach der in 5.4.1 beschriebenen Logik. Zusätzlich wurde im ersten Schleifendurchgang eine Verzögerung zwischen Leitapparatsteuerung und Versorgungspumpenregelung implementiert. Die Versorgungspumpe bekommt den Befehl zur Drehzahlerhöhung und mit einer Verzögerung von  $50ms$  wird der Öffnungsvorgang am Leitapparat eingeleitet.

Während des Anfahrens ist der Durchfluss nicht konstant. Daher liegt hier eine instationäre Strömung vor und es treten Druckschwankungen auf. Bei der Inbetriebnahme hat sich daher gezeigt, dass es zu erheblichen Druckschwankungen der Fallhöhe nach dem Erreichen der Leitapparatendposition kommt und das Abbruchkriterium der Pumpenregelung  $|\Delta H| < \epsilon_H$  zu einem beliebigen Moment erfüllt sein kann. Nach dem Einschwingen des Systems kann es daher zu einer unzulässigen Abweichung der Ist-Fallhöhe zum Sollwert kommen. Dieser Pro-

blematik wurde entgegengewirkt, indem die Pumpenregelung erst beendet wird, nachdem das Abbruchkriterium 20 mal in Folge erfüllt wird. Dieser Wert hat sich für eine Periodendauer von  $251ms$  als ausreichend erwiesen.

# 6 Untersuchung der Auswirkung der Programmparameter auf den Maschinenstart (Startup)

In diesem Kapitel soll die Auswirkung der verschiedenen Programmparameter auf den Maschinenstart analysiert werden. Eingangs werden Standardparameter definiert und in weiterer Folge darauf Bezug nehmend der Einfluss einzelner variiertes Parameter auf die Qualität des Maschinenstarts diskutiert.

## 6.1 Messablauf zum Maschinenstart

Die Einstellungen am Prüfstand hinsichtlich des Wasserstands im Oberwasserkessel, sowie die Schaltung des Versorgungskreislaufes wurden analog zu den Messungen der Leerlaufdrehzahlkennlinien gewählt (siehe Kapitel 4.1). Die Messwerte wurde mit einer Frequenz von  $1200\text{ Hz}$  abgetastet und programmintern über eine Dauer von  $t_{loop} = 251\text{ ms}$  gemittelt und als Mittelwerte ausgegeben. Die Abbruchkriterien für die Leitapparatsteuerung bzw. Versorgungspumpenregelung wurden zu  $\epsilon_H < 0,1\text{ m}$  und  $\epsilon_{LA} < 0,5^\circ$  gewählt.

Die folgenden Messungen wurden für zwei unterschiedliche Programmversionen durchgeführt. Die Benennung erfolgte nach einer fortlaufenden Nummer. Der Unterschied liegt in der Regelung der Versorgungspumpe, wo dieser in v33 im ersten Schleifdurchgang einmalig ein  $dn_P$  gesondert vorgegeben werden kann und in Version v32 diese Funktion nicht existiert. Es soll hierbei der Einfluss auf den Einbruch der Fallhöhe beim Öffnen des Leitapparats untersucht werden.

In einem ersten Schritt wurden Parameter ermittelt, mit welchen ein reproduzierbarer und

Tabelle 6.1: Ausgangsparameter;  $dn_{P,start}$  nur in v33 verfügbar

Ausgangsparameter		
$t_{loop}$	0,251	s
An-/Abstiegsfunktion SPS	50/50	$min^{-1}/s$
$dn_{P,I}$	12,5	$min^{-1}/It.$
$dn_{P,II}$	5	$min^{-1}/It.$
$dn_{P,III}$	1	$min^{-1}/It.$
$dn_{P,start}$	12,5	$min^{-1}/It.$
$\%dn_{T,soll,I}$	50	%
$\%dn_{T,soll,II}$	90	%
$v_{LA,f}$	50	%
Iterationen $v_{LA,f}aktiv$	6	

in der Durchführung zuverlässiger Anfahrvorgang gewährleistet werden konnte um in Anschluss durch Variation der einzelnen Werte ein Set an Parameterlisten nach Tabelle 6.2 zu erhalten. Diese stellen die Basis der Messreihen dar. Die eingangs erwähnten Ausgangsparameter sind in Tabelle 6.1 definiert. Als stationärer Betriebspunkt wurde  $H = 10m$  und  $n_{T,soll} = 700min^{-1}$  für eine Zykluszeit von  $t_{startup} = 6s$  gewählt.

Tabelle 6.2: Messreihen für die variierten Parameter

$v_{LA,f}$	35 %	50 %	70 %
$\%dn_{T,soll,I}$	25 %	50 %	75 %
$\%dn_{T,soll,II}$	70 %	90 %	95 %
An-/Abstiegsfunktion SPS	50/50 $min^{-1}/s$	100/100 $min^{-1}/s$	
$\%dn_{T,soll,I}^*$	12,5 $min^{-1}/It.$	18 $min^{-1}/It.$	25 $min^{-1}/It.$
$\%dn_{T,soll,II}^*$	3 $min^{-1}/It.$	5 $min^{-1}/It.$	7 $min^{-1}/It.$
Iterationen $v_{LA,f}aktiv$	4	6	10 14
* An-/Abstiegsfunktion SPS 100/100 $min^{-1}/s$			

Anschließend an diese Messungen erfolgten zusätzliche Messreihen mit den günstigsten Parametern hinsichtlich einer Minimierung der Fallhöenschwankung um den Sollwert. Diese Parameter wurden weiters für eine Fallhöhe von  $H = 30 m$  getestet. Bei dieser Fallhöhe und einer Turbinendrehzahl von  $n_t = 700 min^{-1}$ , liegt die Leitapparatendstellung bei  $\alpha < 2^\circ$  und der Anfahrvorgang könnte mit dem derzeitigen Setup nicht vernünftig dargestellt werden. Um jedoch einen Vergleich zwischen den Parametern für unterschiedliche Fallhöhen ziehen zu können, wurden die Messungen für dieselbe Leitapparatendstellung äquivalent zu  $H = 10 m$  und  $n_t = 700 min^{-1}$ , durchgeführt.

## 6.2 Messergebnisse für den Maschinenstart

### 6.2.1 Maschinenstart mit Ausgangsparameter

In Abbildung 6.1 ist der zeitliche Verlauf der Fallhöhe  $H$ , des Leitschaufelwinkels  $\alpha$  und der der Turbinendrehzahl  $n_T$  zu sehen. Die Messungen wurden mit den Programmversionen v32 und v33 für die Ausgangsparameter nach 6.1 aufgenommen.

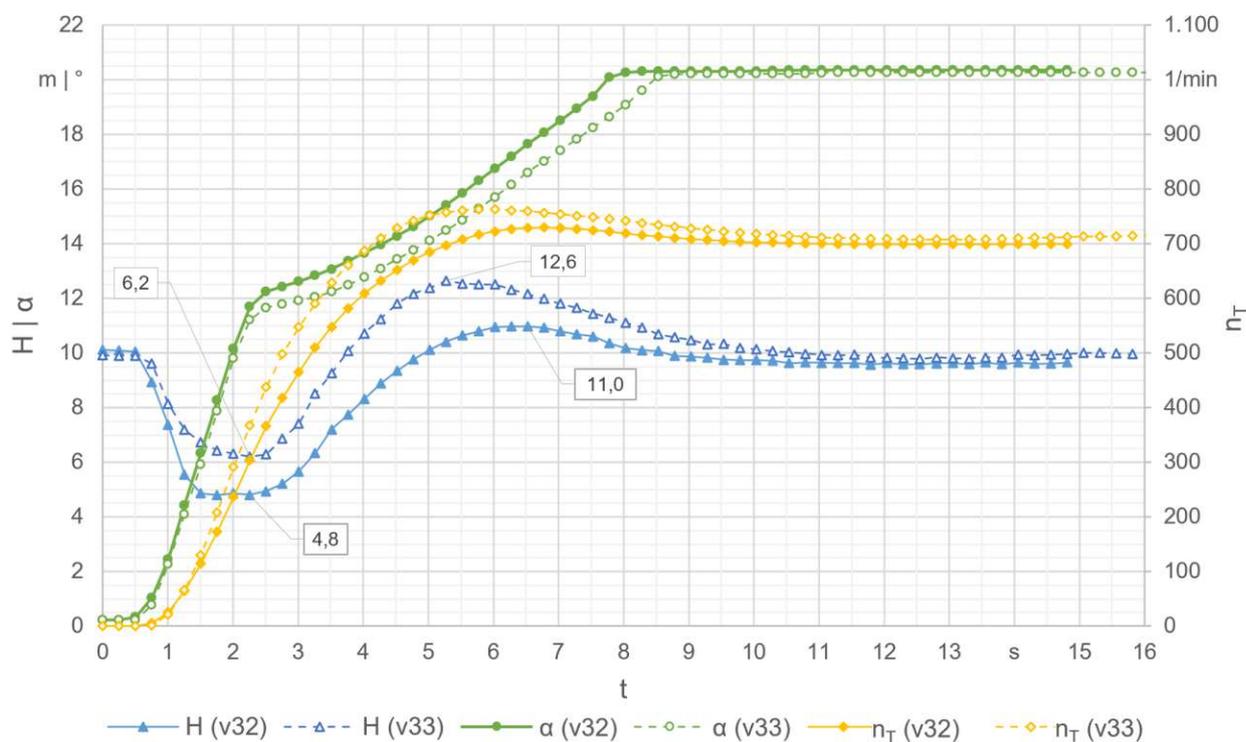


Abbildung 6.1: Zeitlicher Verlauf der Fallhöhe  $H$ , des Leitschaufelwinkels  $\alpha$ , sowie der Turbinendrehzahl  $n_T$  während eines Anfahrvorgangs; durchgeführt mit den Programmversionen v32 und v33

#### Leitschaufelwinkel $\alpha$

Betrachtet man den Verlauf des Leitschaufelwinkels  $\alpha$ , so fällt auf, dass hier entgegen in der Programmierung angenommen, keine konstante Öffnungsgeschwindigkeit vorliegt. Der Übergang in der Verstellgeschwindigkeit von  $v_{LA,f}$  zu  $v_{ber.}$  ist bei  $2,26s$  zu sehen. Weiters zeigt sich, dass die vorgegebene Zeit  $t_{startup}$ , in der der Leitapparat in die vorgegeben Endstellung

fahren soll, in v32 um ca. 1s und in v33 um ca. 2s aufgrund des nicht zeitlich linearen Öffnens überschritten wird.

### Turbinendrehzahl $n_T$

Für beide Programmversionen ist dieselbe Charakteristik im zeitlichen Verlauf der Turbinendrehzahl zu sehen. Weiters lässt sich die Auswirkung der Fallhöhe gut erkennen. Während des schnellen Öffnens des Leitapparats (bis ca. 2,26s) verhält sich der Leitschaufelwinkel für beide Versionen ähnlich. Der geringere Fallhöhenabfall in Version v33 wirkt sich dahingehend auf eine höhere Turbinendrehzahl bei gleichem Leitschaufelwinkel aus. Der Einschwingvorgang nach Erreichen der Leitschaufelendstellung hängt hauptsächlich von Einschwingverhalten der Fallhöhe ab.

Die relative Soll-Ist-Abweichung beträgt für v32 rund  $-0,13\%$  und für v33  $+1,12\%$ .

### Fallhöhe $H$

Aus dem zeitlichen Verlauf der Fallhöhe ist ein Einbruch während des schnellen Öffnens des Leitapparats in beiden Programmversionen gut zu erkennen. Vergleicht man die Messergebnisse der beiden Programmversionen hinsichtlich des max. Höhenabfalls, so wirkt sich die zeitliche Verzögerung zwischen Leitapparatsteuerung und Pumpenregelung positiv aus. In Version v32 fällt die Höhe auf ca. 4,8m und in v33 auf ca. 6,2m ab. Ein ausgeprägter Abfall ist für beide Versionen gut erkennbar. Auf den ersten Blick scheint das Überschwingen der Fallhöhe in Version v33 stärker ausgeprägt zu sein. Betrachtet man hingegen die Differenz zwischen minimaler und maximaler Fallhöhe, so relativiert sich dieser Effekt.

## 6.2.2 Einfluss der Programmparameter auf die Fallhöhe

Der Einfluss der ausgewählten Programmparameter nach Tabelle 6.2 ist in Abbildung 6.3 (a) bis (f) dargestellt. Aus den Messergebnissen geht hervor, dass die Öffnungsgeschwindigkeit  $v_{LA,f}$  (a) während des schnellen Öffnens den stärksten Einfluss auf den Fallhöhenabfall hat. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Öffnungsgeschwindigkeit der Höhenabfall zunimmt, wohingegen das max. Überschwingen kleiner wird.

Die Auswirkung der Grenze  $\%dn_{T,soll,I}$  (b) auf die max. Fallhöhenabfall sind gering. Hingegen

zeigt sich, je höher diese Grenze gewählt wird, desto stärker wird auch das Überschwingen der Fallhöhe. Aus den Messwerte lässt sich ebenso eine Einfluss auf die Einschwingdauer ablesen. Wird nämlich die  $\%dn_{T,soll,I}$  überschritten und man befindet sich innerhalb der Grenzen bis  $\%dn_{T,soll,II}$  (c), so wird die Versorgungspumpe um den Wert  $dn_{P,II}$  (f) nachgeregelt. D.h., die Drehzahl und dementsprechend auch die Fallhöhe werden langsamer verringert. Weiters ist zu sehen, dass für kleiner gewählte Grenzen  $\%dn_{T,soll,II}$  ein positiver Effekt auf den Fallhöhen einbruch zu sehen ist. Ebenso zeigt sich wieder eine Zunahme des max. Überschwingens für größer werden Werte  $dn_{P,I}$  (e). In Version v33 kann auch ein minimaler Einfluss auf das Absenken der Fallhöhe verzeichnet werden.

Bei einer Rampe von  $min^{-1}/s$  für die An-/Abstiegsfunktion können deutliche Unterschiede in der Fallhöhenschwankung zwischen den unterschiedlichen Programmversionen beobachtet werden. Die Messungen mit v32 zeigen einen stärkeren Einbruch der Fallhöhe, dementsprechend ist das Überschwingen weniger stark ausgeprägt. Mit Version v33 stellt sich ein entgegengesetztes Verhalten ein, also weniger stark ausgeprägter Höhenabfall bei stärkerem Überschwingen. Weiters zeigt sich für größer werdende Rampenwerte eine Relativierung zwischen den Programmversionen.

Die zeitlichen Verläufe der Messgrößen der variierten Parameter können bei weiterführendem Interesse aus Anhang A entnommen werden.

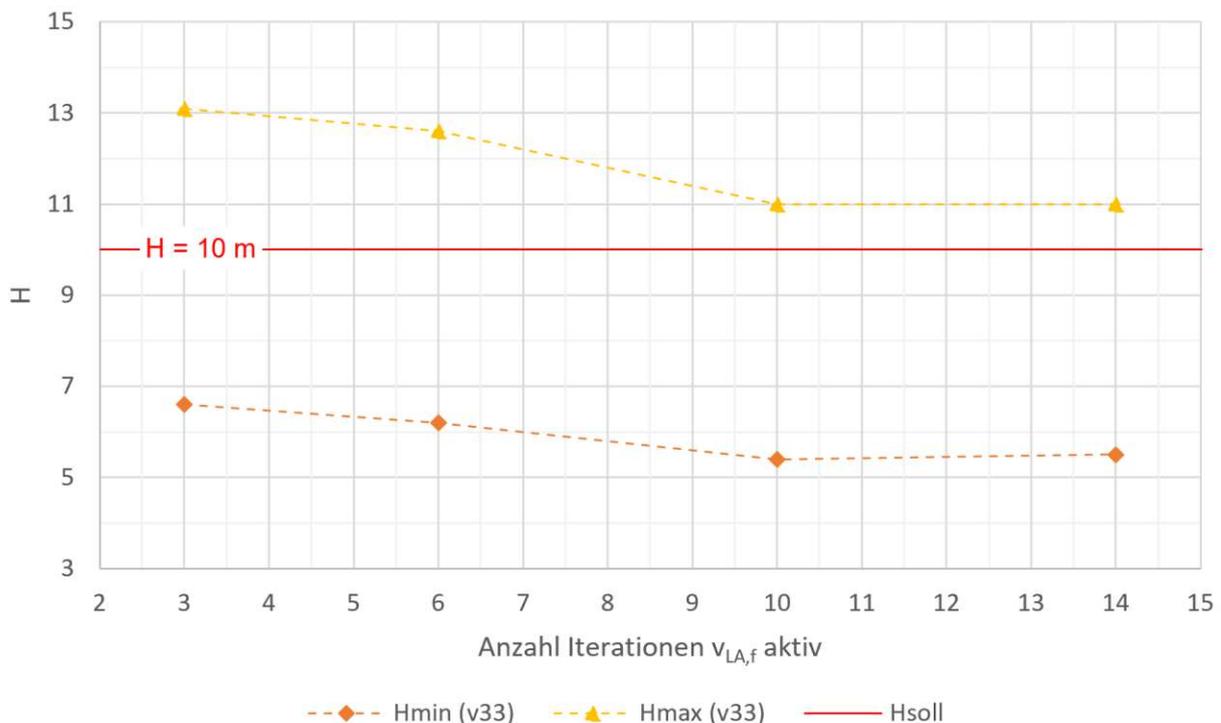


Abbildung 6.2: Auswirkung der Anzahl an Schleifendurchgängen mit schnellem Öffnen des Leitapparats auf die Ist-Soll-Abweichung der Fallhöhe

In einer weiteren Messreihe wurde der Einfluss der Anzahl an Schleifendurchgänge während der der Linearantrieb mit der Geschwindigkeit  $v_{LA,f}$  verfährt, eruiert. Die Messergebnisse sind in 6.2 dargestellt. Es zeigt sich klar, je kürzer die Anzahl an Schleifendurchgängen gewählt wird, desto kleiner ist auch das Absinken der Fallhöhe. Die Differenz zwischen der min. Fallhöhe und dem max. Überschwingen ist für alle dargestellten Messwerte ähnlich. Es zeigt sich, dass das Überschwingen weniger von der Anzahl an Schleifendurchgängen für  $v_{LA,f}$  *aktiv* abhängig ist, als von der Regelgeschwindigkeit der Versorgungspumpe.

### 6.2.3 Optimale Programmparameter

Mithilfe der Erkenntnisse der Parameteruntersuchungen aus Kapitel 6.2.2, wurde letztlich ein Parameterset gefunden, mit welchem ein Anfahrvorgang für den Betriebspunkt  $H = 10\text{ m}$  und  $n_T = 700\text{ min}^{-1}$  hinreichend zufriedenstellend abgebildet werden kann. Diese sind in Tabelle 6.3 aufgelistet. Dabei wurde das Hauptaugenmerk auf eine minimale Soll-Ist-Abweichung der Fallhöhe während des Anfahrvorgangs gelegt.

Tabelle 6.3: Parameterset  $v33\_15$

$t_{loop}$	0,251	s
An-/Abstiegsfunktion SPS	100/100	$\text{min}^{-1}/s$
$dn_{P,I}$	25	$\text{min}^{-1}/It.$
$dn_{P,II}$	5	$\text{min}^{-1}/It.$
$dn_{P,III}$	1	$\text{min}^{-1}/It.$
$dn_{P,start}$	50	$\text{min}^{-1}/It.$
$\%dn_{T,soll,I}$	42	%
$\%dn_{T,soll,II}$	90	%
$v_{LA,f}$	37	%
Iterationen $v_{LA,f}$ <i>aktiv</i>	6	

Die Öffnungsgeschwindigkeit  $v_{LA,f}$  wurde im Vergleich zu den Ausgangsparametern leicht verringert und das Inkrement  $dn_{P,start}$  auf  $50\text{min}^{-1}/It.$  erhöht, bei einer An-/Abstiegsfunktion von  $100\text{ min}^{-1}/s$ . Rechnet man diese Rampe um, so regelt die SPS die Versorgungspumpe zwar weiterhin maximal mit rund  $25\text{min}^{-1}/It.$  nach, jedoch erhält diese durch das erhöhte  $dn_{P,start}$  von Beginn an einen höheren Sollwert und kann somit in der kritischen Phasen, innerhalb der ersten ein bis zwei Sekunden, entkoppelt vom Mess- und Steuerungsprogramm in *LabVIEW* arbeiten. Um einen damit einhergehenden Überschwingen entgegen zu wirken, wurde die Grenze  $\%dn_{T,soll,I}$  herabgesetzt. Das Inkrement  $dn_{P,I}$  wurde auf die Rampe der

6 Untersuchung der Auswirkung der Programmparameter auf den Maschinenstart  
(Startup)

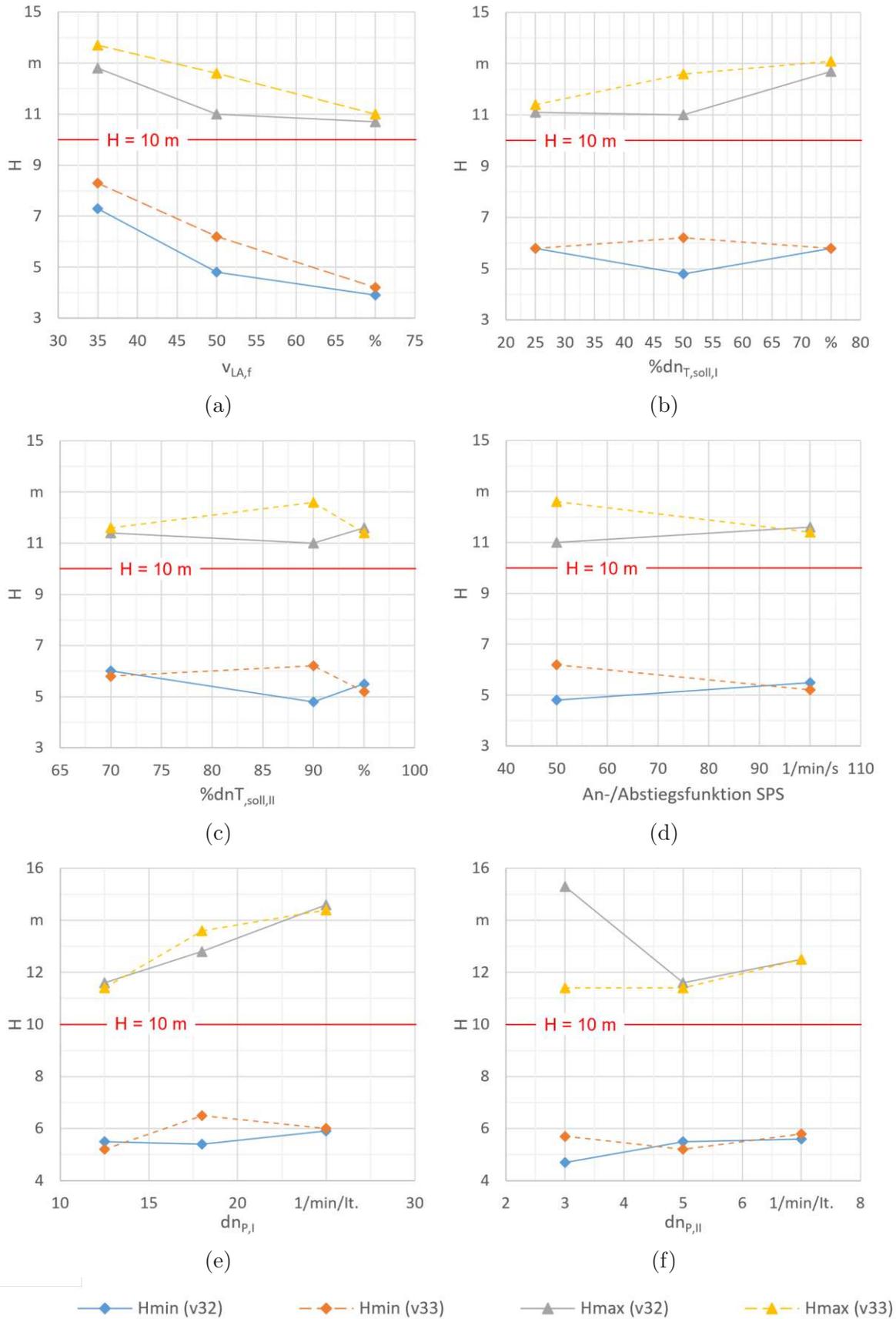


Abbildung 6.3: Einfluss der variierten Parameter auf die Fallhöhenabweichung: Angegeben sind hier die min. bzw. max gemessenen absoluten Fallhöhen während eines Anfahrvorgangs.

SPS angepasst. Das Ergebnis dieses Parametersatzes ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

Die Problematik des nichtlinearen Öffnens des Leitapparats konnte auch hier nicht gelöst werden. Vor allem im Umschaltmoment zwischen den Öffnungsgeschwindigkeiten stellt sich eine Verzögerung von 1 – 1,5 s ein. Hier zeigt sich wieder, dass der zum Zeitpunkt dieser Arbeit verbaute Linearantrieb nicht den Anforderungen für die Abbildung eines realitätsnahen Anfahrvorgangs bis zum Erreichen der Synchrodrehzahl nicht standhält. Die Fallhöhenchwankungen konnten hingegen auf  $-1,2 / + 1 m$  minimiert werden. Die relative Sollwert-Abweichung beträgt hier rund  $-0,11 \%$  für die Fallhöhe bzw.  $1,82 \%$  für die Turbinendrehzahl.

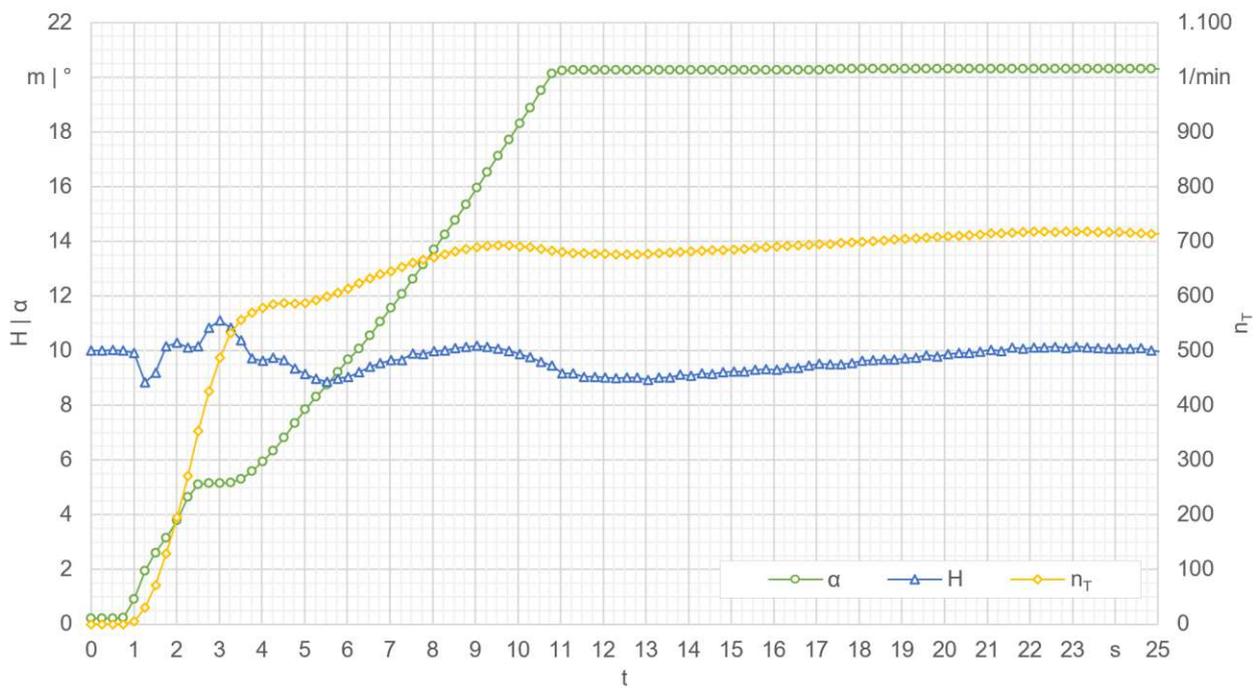


Abbildung 6.4: Grafische Darstellung eines Anfahrvorgangs mit Parameterset  $v33_5$ ; durchgeführt mit Programmversion  $v33$

Eine weitere Messung wurde für eine Fallhöhe von  $H = 30 m$  durchgeführt. Da eine Turbinendrehzahl von  $n_T = 700 \text{ min}^{-1}$  bei dieser Fallhöhe einem Leitschaufelwinkel von  $\alpha < 1^\circ$  entsprechen würde, wurde die Drehzahl so gewählt, dass der Verdrehwinkel der Leitschaufeln den Messungen nach Kapitel 6.2.1 entspricht. Die Messergebnisse sind in 6.5 grafisch dargestellt. Hier zeigt sich die Problematik des Linearantriebs sehr gut. Der Anfahrvorgang wird bei  $t = 1,25 s$  eingeleitet und der Linearantrieb bekommt eine Endposition als Sollwert vorgegeben. Zunächst öffnen die Leitschaufeln ca.  $1^\circ$  und die Turbine wird auch rund  $600 \text{ min}^{-1}$  beschleunigt. Erst ab  $t = 21,5 s$  öffnet der Leitapparat vollständig und die Turbine erreicht die Soll-Drehzahl bei  $t = 40 s$ . Die relative Abweichung der Drehzahl beträgt ca.  $-0,8\%$  und

jene der Fallhöhe ca. 0,1%. Ebenso tritt wieder ein markantes Abfallen der Fallhöhe auf. Hier wird bestätigt, dass der plötzliche Anstieg der Durchflussmenge einen massiven Höhenabfall zur Folge hat.

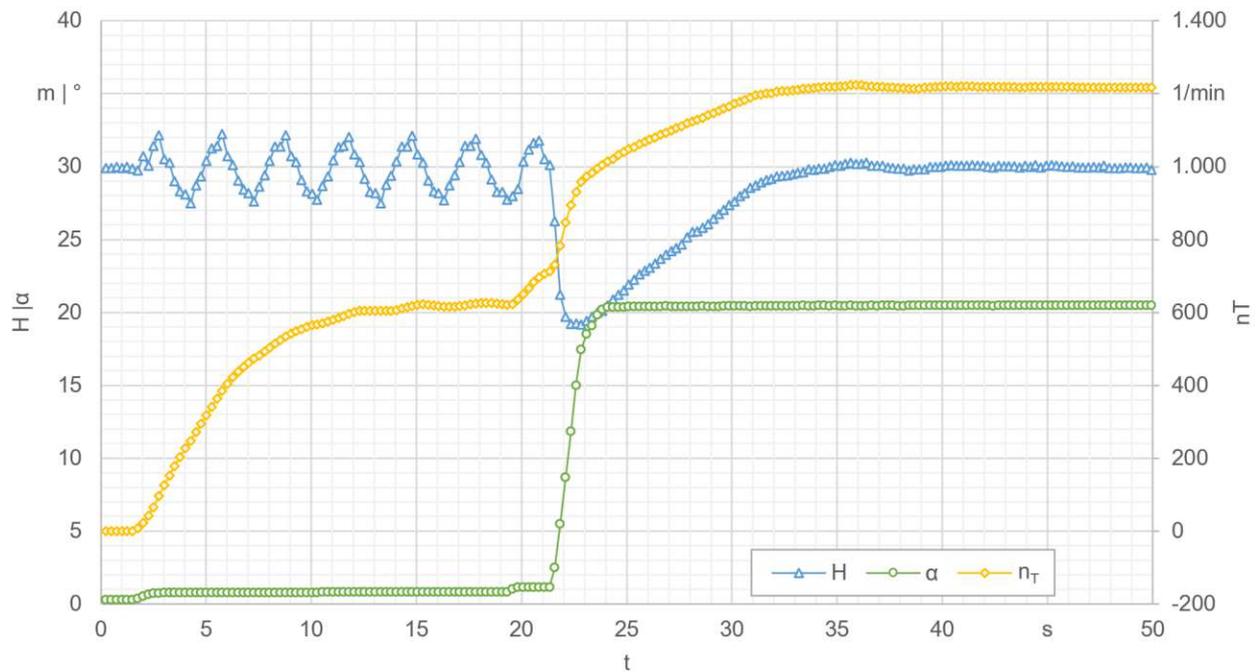


Abbildung 6.5: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit für den optimierten Parametersatz für den Betriebspunkt  $H = 30 \text{ m}$  und  $n_T = 1229 \text{ min}^{-1}$ ; durchgeführt mit Programmversion v33

### 6.3 Schlussfolgerung zum Maschinenstart

Ein realitätsnahes Anfahren der Turbine, wie es in Kapitel 2.3 dargestellt wird, ist mit der Prüfstandkonfiguration, wie sie während der Durchführung dieser Arbeit vorgelegen hat, nur eingeschränkt möglich. In Abbildung 6.1 ist deutlich zu erkennen, dass aufgrund einer Unterdimensionierung des Leitapparatverstellmechanismus keine lineare Öffnungscharakteristik während des Hochfahrvorgangs vorliegt. Dieser Sachverhalt ist für Messungen bei größeren Fallhöhen, wie eine solche in Abbildung 6.5 dargestellt ist, noch deutlicher ausgeprägt. Bei einer vorgegebenen Öffnungszeit von  $t = 6 \text{ s}$  erreicht der Leitapparat erst nach rund  $22 \text{ s}$  seine Endposition. Aufgrund dieser starken Regelabweichung können die zeitlichen Vorgaben für den Hochfahrvorgang nicht zufriedenstellend genau eingehalten werden.

Wie in Abbildung 6.1 deutlich erkennbar ist, erfolgt erst nach rund drei Iterationen eine konstante Zunahme des Leitappartwinkels  $\alpha$ . Dieses Verhalten ist ebenso nach dem Wechsel der vorgegebenen Verstellgeschwindigkeit ab  $t = 2,25s$  erkennbar. In der Bachelorarbeit [21] wird hingegen gezeigt, dass Zylinderhub des Linearantriebs und der Öffnungswinkel der Leitschaukeln  $\alpha$  einen linearen Zusammenhang besitzen. Berücksichtigt man nun auch die Beobachtung, dass v. a. für größere Fallhöhen die Leitschaukeln im Bereich kleiner Öffnungswinkel  $\alpha$  während des Anfahrvorgangs entweder zum Stillstand geraten oder nur sehr zögerlich öffnen, kann für den vorliegenden Einsatzzweck eine Unterdimensionierung des Linearantriebs als Ursache angenommen werden.

# 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Diplomarbeit wurden experimentelle Betrachtungen eines Maschinenstarts (startup) an einer Modellpumpturbine im Turbinenbetrieb angestellt und diese gliedert sich in drei Bereiche. Der Prüfstand befindet sich am Institut für Energietechnik und Thermodynamik an der Technischen Universität Wien. Sämtliche durchgeführte Messungen wurden in einem geschlossenen Versuchskreislauf durchgeführt.

Im Zuge dieser Arbeit wurden zunächst theoretische Überlegungen zu den Strömungsverhältnissen am Laufrad im stationären Leerlauf angestellt. Es wurde gezeigt, dass für konstante Leitapparatstellungen  $\alpha_1$  die Turbinendrehzahl  $n_T$  im Wesentlichen vom Durchfluss abhängt. In weiterer Folge wurde eine Literaturrecherche zu gängigen Hochfahrerschemata durchgeführt.

Der erste Teil dieser Arbeit widmet sich der experimentellen Ermittlung der Leerlaufdrehzahlkennlinien des Pumpturbinen-Versuchsstandes, sowie der Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Turbinendrehzahl  $n_T$ , der Fallhöhe  $H$  und der Öffnungswinkel  $\alpha$  des Leitapparats. Dementsprechend wurden die Leerlaufdrehzahlen gemäß eines Messrasters für Fallhöhen  $H$  zwischen  $10m$  und  $30m$  in  $5m$ -Schritten und Öffnungswinkeln  $\alpha$  zwischen  $0^\circ$  und dem Maximalwert von  $35^\circ$  in Schritten von  $2,5^\circ$  aufgenommen. Die Messergebnisse wurden durch Polynomfunktionen 2. Grades angenähert und somit ein mathematischer Zusammenhang zwischen Turbinendrehzahl  $n_T$ , Fallhöhe  $H$  und Leitapparatwinkel  $\alpha$  hergestellt. Aufbauend auf diese Funktionen wurde ein Kennlinienfeld zur Ermittlung des Leitapparatwinkels in Abhängigkeit der Turbinendrehzahl und Fallhöhe im Bereich von  $10m$  bis  $30m$  in  $1m$ -Schritten in der Form von Gleichung 5.2 ermittelt.

Die Erkenntnisse aus den Messungen der Leerlaufdrehzahl, sowie das Kennlinienfeld bilden die Basis für die programmtechnische Umsetzung der Anfahrautomatik in das Mess- und Steuerungsprogramm des Pumpturbinenprüfstandes. In einer Initialisierungsphase muss der Bediener einen Betriebspunkt durch Vorgabe der Soll-Turbinendrehzahl  $n_{T,soll}$  und der Soll-Fallhöhe  $H_{soll}$  definieren. Anhand des Kennlinienfeldes wird die entsprechende Leitappara-

tendstellung berechnet und als Sollwert vorgegeben und der Anfahrzyklus kann gestartet werden. Der Leitappart öffnet anschließend über die Dauer einer vorgegebenen Zykluszeit  $t_{startup}$  bis zum Erreichen des Sollwerts. Zeitgleich wird die Ist-Fallhöhe mittels Regelung der Versorgungspumpendrehzahl der initialisierten Soll-Fallhöhe nachgeführt. Bereits erste Funktionstests zeigten Probleme am Linearantrieb des Leitapparatverstellmechanismus auf. Kleine Verstellsschritte in der Größenordnung von  $0,15^\circ$  je Schleifendurchgang konnten vom Antrieb nicht ausgeführt werden, weshalb ein neuer programmtechnischer Ansatz zur Leitapparatsteuerung gewählt wurde. Weiters wurde beobachtet, dass v.a. für größere Fallhöhen die Leitschaukeln im Bereich kleiner Öffnungswinkel  $\alpha$  während des Anfahrvorgangs entweder zum Stillstand geraten oder nur sehr zögerlich öffnen. Seitens des Herstellers wurde bestätigt, dass der verbaute Linearantrieb die festgesetzten Anforderungen nicht erfüllt. Im abschließenden Teil dieser Arbeit wurden die Auswirkungen der Programmparameter auf den Anfahrzyklus untersucht, sowie ein optimaler Parametersatz ermittelt. Das Hauptaugenmerk wurde auf eine zufriedenstellende Öffnungscharakteristik des Leitapparats und auf die Minimierung Fallhöhenabweichung vom Soll-Wert gelegt. Ein geeigneter Parametersatz wurde mit Tabelle 6.3 gefunden und der Anfahrzyklus ist in Abbildung 6.4 dargestellt. Eine realitätsnahe Abbildung eines Anfahrzyklus konnte mit der Prüfstandkonfiguration, wie sie während der Durchführung dieser Arbeit vorgelegen hat, nicht erreicht werden. Aufgrund der verzögerten Leitapparatöffnung kann die vorgegebene Zykluszeit  $t_{startup}$  nicht hinreichend genau eingehalten und ein Hochfahrschema, wie in [12] dargestellt, nicht reproduziert werden.

Im Rahmen von weiteren Arbeiten und neuen Messungen könnten weitere Punkte untersucht bzw. verbessert werden:

- Für weitere Arbeiten in diesem Themengebiet wäre eine Verbesserung des Linearantriebs am Prüfstand empfehlenswert. Dieser sollte zumindest einen minimalen Verstellschritt von  $0,1^\circ$  an der Leitschaukel ausführen können. In weiterer Folge können neue Parametertests durchgeführt werden, um die Frage zu klären, ob ein realitätsnaher Anfahrzyklus abgebildet werden kann.
- Im Zuge der Parametertests wurde auch ein Abfallen der Fallhöhe während des Öffnungsvorgangs festgestellt. Diese Beobachtung wirft die Frage auf, ob am Prüfstand auch gezielte Druckstöße simuliert werden können.
- Aufgrund von zeitlich parallelen Arbeiten am Versuchskreislauf während der Durchführungen der Messungen, kam es zu Abweichungen bei den Leerlaufkennlinien, weshalb

diese erneut aufgenommen werden mussten. Weitere Messungen mit einem dichteren Messraster, sowie repetitive Messungen würden zu genaueren Leerlaufkennlinien führen.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Inländische Erzeugung von Rohenergie aus Windkraft und Photovoltaik (eigene Grafik, Datenquelle: Statistik Austria[3]) . . . . .	2
2.1	Geschwindigkeitsverhältnisse am Laufrad . . . . .	5
2.2	Geschwindigkeitsdreiecke am Eintritt (links) und am Austritt (rechts): Darstellung von Absolut- und Relativgeschwindigkeit mit ihren dazugehörigen Komponenten parallel und senkrecht zur Umfangsgeschwindigkeit. . . . .	6
2.3	Geschwindigkeitsdreiecke am Laufradeintritt (links) und am Laufradaustritt (rechts); dargestellt für zwei Betriebspunkte im lastfreien Fall bei unveränderter Leitapparatstellung . . . . .	7
2.4	Momentengleichgewicht am Wellenstrang: <i>1 Motorgenerator, 2 Welle, 3 hydrostatisches Lager, 4 Laufrad</i> . . . . .	11
2.5	Hochfahrschema nach [12] (a) ohne und nach [13] (b) mit Übersteuern . . . . .	12
3.1	Anlagenschema Pumpturbinenprüfstand: <i>1 Oberwasserkessel, 2 Modellmaschine, 3 hydrostatisches Lager, 4 Drehmomentenmessflansch, 5 Motorgenerator, 6 Unterwasserkessel, 7 Versorgungspumpe, 8 Durchflussaufnehmer, 9 und 10 Spaltwasser-Durchflussaufnehmer, 11, Druckaufnehmer, 12 Ausgleichsbehälter, 13 Ausgleichspumpe, 14 Kühlwasserpumpe, 15 Wärmetauscher-Triebwasser, 16 Kugelschieber, 17 - 22 Absperrklappe, 23 Nadelventil, 24 Entlüftungsventil, 25 Druckluftkompressor, 26 Vakuumpumpe, 27 Versorgungsbecken</i> . . . . .	14
3.2	Halbschnitt durch die Modellmaschine: Leitapparatverstellung bestehend aus Leitschaufeln, Verstellring und Linearantrieb . . . . .	15
3.3	Leitschaufelöffnung und Angriffspunkt der resultierenden Druckkraft nach [10], eigene Adaptierung . . . . .	17
3.4	Druckmessstellen der Drücke $p_1$ und $p_2$ bzw. des Differenzdrucks $\Delta p_{12}$ . . . . .	19
3.5	Aufteilung der Volumenströme nach [19] . . . . .	20
3.6	Schematischer Überblick der Messwerterfassung und Steuerung . . . . .	21
4.1	Leerlaufdrehzahlkennlinie Versuchskreislaufschemata . . . . .	24

4.2	Vergleich der Leerlaufdrehzahlkennlinien ermittelt für konstanten Druck $p_1 = [1, 2, 3] \text{ bar}$ (links) und konstanter Fallhöhe $H = [10, 20, 30] \text{ m}$ (rechts) . . .	25
4.3	Verlauf des Durchflusses $Q$ bei variiertem Fallhöhe $H = [10, 20, 30] \text{ m}$ . . . .	26
4.4	Messergebnisse der Leerlaufdrehzahlen $n$ bei unterschiedlichen Leitapparatstellungen $\alpha$ ; aufgenommen für konstante Fallhöhen $H = [10, 15, 20, 25, 30] \text{ m}$	27
4.5	Verlauf der maximalen Leerlaufdrehzahl für die Fallhöhen $H = [10, 15, 20, 25, 30] \text{ m}$ mit angenäherter quadratischer Polynomfunktion . . . . .	28
4.6	Einfluss von Fallhöhe $H$ (links) und Durchfluss $Q$ (rechts) auf die Turbinendrehzahl $n_T$ ; ausgewertet für Linien konstanter Leitapparatöffnungen $\alpha$ . . .	29
4.7	Weitere Darstellung der Messergebnisse der Leerlaufdrehzahlen: Zusammenhang zwischen Leerlaufdrehzahl und Fallhöhe für unterschiedliche Leitapparatstellungen mit angenäherten Polynomfunktionen 2. Grades . . . . .	30
5.1	Benutzeroberfläche des aktuellen Mess- und Steuerungsprogramm ohne Implementierung der Anfahrautomatik . . . . .	33
5.2	Skizzierter Programmablaufplan des aktuellen Mess- und Steuerungsprogramms; Ablauf von Programmstart bis zur Datenerfassung . . . . .	35
5.3	Kennlinienfeld basierend auf den Ergebnissen aus Gleichung 5.2 mit Kennlinien für konst. Fallhöhen; auf der Abszissenachse ist die Turbinendrehzahl $n_T$ in $\text{min}^{-1}$ und auf der Ordinatenachse die Leitapparatstellung $\alpha$ in $^\circ$ aufgetragen.	37
5.4	Zusammenhang zwischen der Leitschaufelstellung $\alpha$ in $\%$ und $^\circ$ ; Messpunkte durch Polynom 6. Grades angenähert. . . . .	38
5.5	Programmablaufplan der implementierten Anfahrautomatik . . . . .	41
5.6	Leitapparatöffnungsgeschwindigkeit: konstant vs. binär . . . . .	42
5.7	Benutzeroberfläche der implementierten Anfahrautomatik . . . . .	44
5.8	Grafische Darstellung der variierbaren Parameter . . . . .	46
5.9	Qualitative Veranschaulichung der Öffnungscharakteristik des Leitapparates bis Erreichen des Leitapparatendwerts $\alpha_0$ . Links: Vorgabe einer fixen Schrittweite. Rechts: Vorgabe des Endwerts und der Öffnungsgeschwindigkeit. . . .	48
6.1	Zeitlicher Verlauf der Fallhöhe $H$ , des Leitschaufelwinkels $\alpha$ , sowie der Turbinendrehzahl $n_T$ während eines Anfahrvorgangs; durchgeführt mit den Programmversionen v32 und v33 . . . . .	52
6.2	Auswirkung der Anzahl an Schleifendurchgängen mit schnellem Öffnen des Leitapparats auf die Ist-Soll-Abweichung der Fallhöhe . . . . .	54
6.3	Einfluss der variierten Parameter auf die Fallhöhenabweichung: Angegeben sind hier die min. bzw. max gemessenen absoluten Fallhöhen während eines Anfahrvorgangs. . . . .	56

6.4	Grafische Darstellung eines Anfahrvorgangs mit Parameterset $v33_15$ ; durchgeführt mit Programm	
6.5	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit für den optimierten Parametersatz für den Betriebspunkt $H = 30 \text{ m}$ und $n_T = 1229 \text{ min}^{-1}$ ; durchgeführt mit Programmversion v33 . . . . .	58
A.1	Einfluss der Fallhöhe $H$ auf die Turbinendrehzahl $n_T$ ; ausgewertet für Linien konstanter Leitapparatöffnungen $\alpha$ . . . . .	71
A.2	Einfluss des Durchflusses $Q$ auf die Turbinendrehzahl $n_T$ ; ausgewertet für Linien konstanter Leitapparatöffnungen $\alpha$ . . . . .	72
A.3	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32_01 . .	74
A.4	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32_02 . .	75
A.5	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32_03 . .	75
A.6	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32_04 . .	76
A.7	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32_05 . .	76
A.8	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32_06 . .	77
A.9	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32_07 . .	77
A.10	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32_08 . .	78
A.11	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32_09 . .	78
A.12	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32_10 . .	79
A.13	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32_11 . .	79
A.14	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32_12 . .	80
A.15	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32_13 . .	80
A.16	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32_14 . .	81
A.17	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_01 . .	81
A.18	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_02 . .	82
A.19	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_03 . .	82
A.20	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_04 . .	83
A.21	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_05 . .	83
A.22	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_06 . .	84
A.23	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_07 . .	84
A.24	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_08 . .	85
A.25	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_09 . .	85
A.26	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_10 . .	86
A.27	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_11 . .	86
A.28	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_11 . .	87
A.29	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_12 . .	87
A.30	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_13 . .	88
A.31	Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_14 . .	88

A.32 Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_15 . . .	89
A.33 Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_16 . . .	89
A.34 Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_17 . . .	90
A.35 Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33_18 . . .	90

# Literaturverzeichnis

- [1] *European Commission*, “Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee, the committee of the regions and the european investment bank a framework strategy for a resilient energy union with a forward-looking climate change policy,” COM(2015) 80 final, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1416170084502&uri=CELEX:32014R0269>.
- [2] BMNT und BMVIT, “#mission2030: Die österreichische Klima- und Energiestrategie,” 2018.
- [3] Statistik Austria, “Gesamtenergiebilanz Österreich 1970 bis 2019,” [http://statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET\\_NATIVE\\_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=029955](http://statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_NATIVE_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=029955), abgerufen am 10.06.2021. [Online]. Available: [http://statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET\\_NATIVE\\_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=029955](http://statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_NATIVE_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=029955)
- [4] M. Schmid and A. Lechner, “Konzepte und Umsetzung moderner Pumpspeicherkraftwerke,” *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 133, no. 4-5, pp. 208–210, 2016.
- [5] H. J. Huth, “Fatigue Design of Hydraulic Turbine Runners,” Dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2005.
- [6] R. Goyal, M. J. Cervantes, and B. K. Gandhi, “Synchronized PIV and pressure measurements on a model Francis turbine during start-up,” *Journal of Hydraulic Research*, vol. 58, no. 1, pp. 70–86, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/00221686.2018.1555551>

- [7] J. Unterluggauer, “Investigation on Critical Low-Load and Transient Operation of a Prototype Francis Turbine,” Dissertation, Technische Universität Wien, Wien, 2019.
- [8] K. Menny, *Strömungsmaschinen: Hydraulische und thermische Kraft- und Arbeitsmaschinen ; mit 36 Tabellen und 47 Beispielen*, 5th ed., ser. Lehrbuch Maschinenbau. Wiesbaden: Teubner, 2011.
- [9] C. Pfeleiderer and H. Petermann, *Strömungsmaschinen*, 7th ed. Braunschweig: Springer-Verlag, 2005.
- [10] C. Bauer, “Hydraulische Maschinen und Anlagen I und II,” Vorlesungsskriptum, Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Forschungsbereich Strömungsmaschinen, Technische Universität Wien, 2016.
- [11] M. Eichhorn, “Fatigue Analysis of Prototype Francis Turbines Using Numerical Simulations and Site Measurements,” Dissertation, Technische Universität Wien, Wien, 2017.
- [12] C. TRIVEDI, M. J. CERVANTES, B. GANDHI, and G. O. DAHLHAUG, “Experimental investigations of transient pressure variations in a high head model francis turbine during start-up and shutdown,” *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, vol. 26, no. 2, pp. 277–290, 2014.
- [13] M. Gagnon, S. A. Tahan, P. Bocher, and D. Thibault, “Impact of startup scheme on francis runner life expectancy,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 12 (No.1) (2010)*, 2010.
- [14] R. Tao, X. Zhou, B. Xu, and Z. Wang, “Numerical investigation of the flow regime and cavitation in the vanes of reversible pump-turbine during pump mode’s starting up,” *Renewable Energy*, vol. 141, pp. 9–19, 2019.
- [15] J. Unterluggauer, V. Sulzgruber, E. Doujak, and C. Bauer, “Experimental and numerical study of a prototype francis turbine startup,” *Renewable Energy*, vol. 157, pp. 1212–1221, 2019.
- [16] A. Maly, “Einfluss der Einbautiefe auf das Kennlinienverhalten einer Pumpturbine im Turbinenbetrieb,” Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Wien, 2015.

- [17] A. Maly, “Experimental Investigation of Free Surface Oscillation in the Draft Tube of Hydraulic Machines,” Dissertation, Technische Universität Wien, Wien, 2019.
- [18] A. Pfarr, *Die Turbinen für Wasserkraftbetrieb, Ihre Theorie und Konstruktion*, 2. Auflage ed., ser. Lehrbuch Maschinenbau. Berlin: Springer-Verlag, 1912.
- [19] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION IEC., “IEC-60193: Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Model acceptance tests,” 1999.
- [20] G. Edinger, “Experimentelle Untersuchungen zum tiefen Teillastbetrieb von Pumpturbinen,” Dissertation, Technische Universität Wien, Wien, 2014.
- [21] M. Walter, “Adaption der Leitapparatverstellung einer Modellpumpturbine,” Bachelorarbeit, Technische Universität Wien, Wien, 2017.



# A Anhang

## A.1 Leerlaufdrehzahlkennlinie

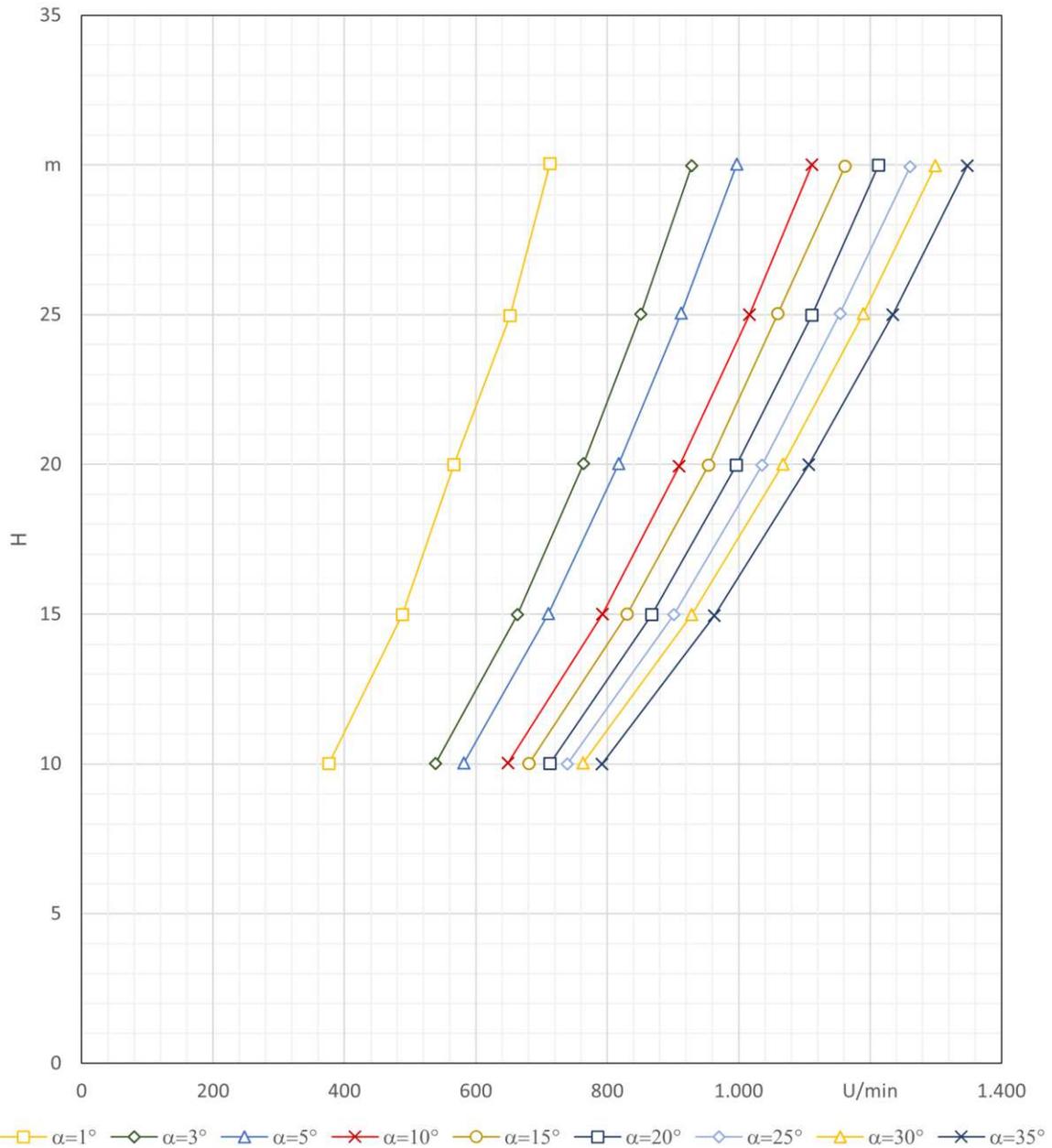


Abbildung A.1: Einfluss der Fallhöhe  $H$  auf die Turbinendrehzahl  $n_T$ ; ausgewertet für Linien konstanter Leitapparatöffnungen  $\alpha$

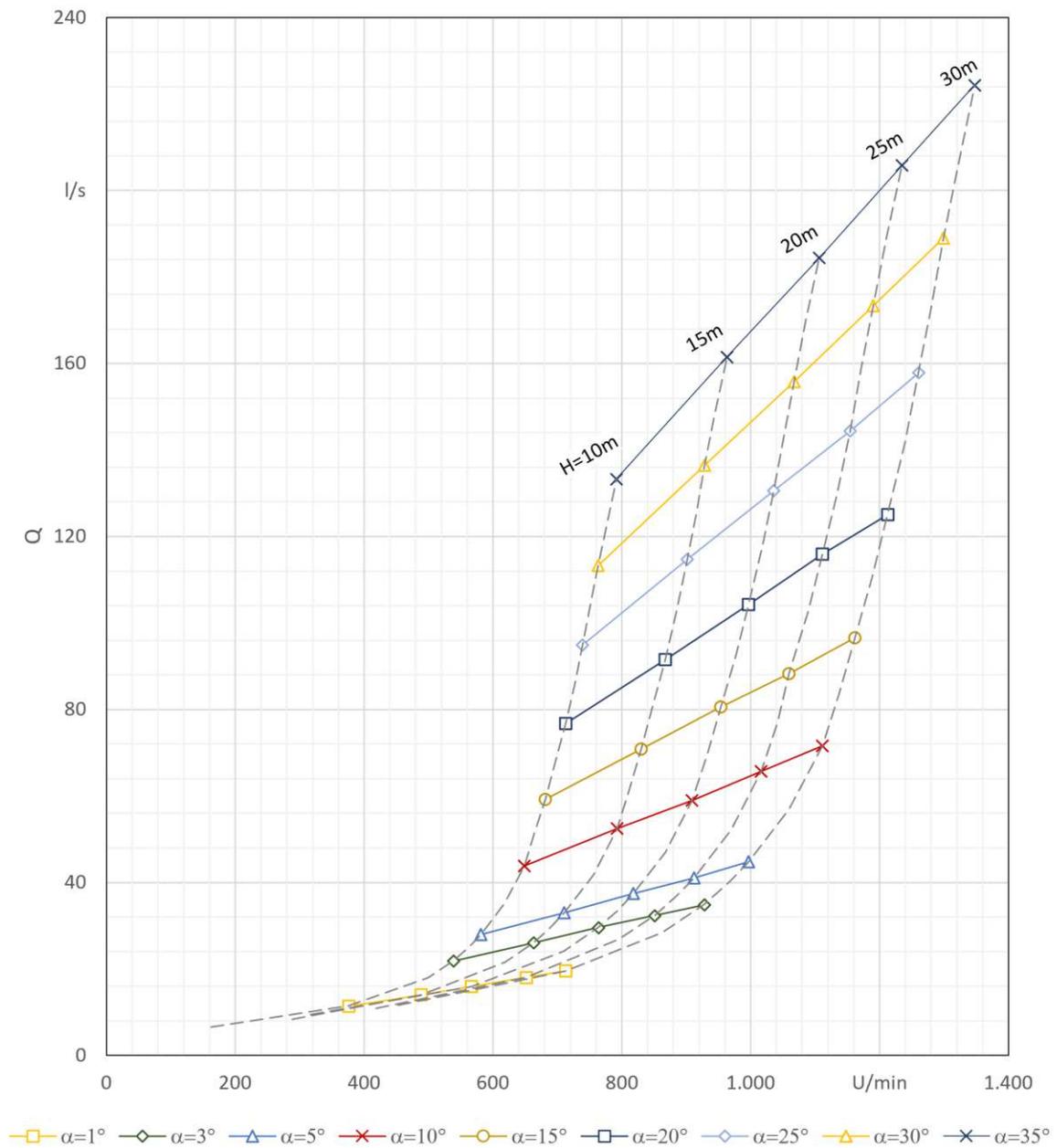


Abbildung A.2: Einfluss des Durchflusses  $Q$  auf die Turbinendrehzahl  $n_T$ ; ausgewertet für Linien konstanter Leitapparatöffnungen  $\alpha$

Tabelle A.1: Getestete Parametersets für die Programmversionen v32 und v33

Messreihe	$t_{loop}$ s	$n_{Soll}$ $min^{-1}$	$t_{startup}$ s	H m	$dn_P$ $min^{-1}/It.$				$\%n_{T,Soll}$ %		$v_{LA,f}$ %	It.	Rampe SPS $min^{-1}/s$	Version
					I	II	II	start	I	II				
v32_01	0,3	750	6	10	12,5	5	1	-	50	90	50	6	50/50	v32
v32_02	0,3	750	6	10	12,5	5	1	-	50	90	70	6	50/50	v32
v32_03	0,3	750	6	10	12,5	5	1	-	50	90	35	6	50/50	v32
v32_04	0,3	750	6	10	12,5	5	1	-	25	90	50	6	50/50	v32
v32_05	0,3	750	6	10	12,5	5	1	-	75	90	50	6	50/50	v32
v32_06	0,3	750	6	10	12,5	5	1	-	50	95	50	6	50/50	v32
v32_07	0,3	750	6	10	12,5	5	1	-	50	70	50	6	50/50	v32
v32_08	0,3	750	6	10	12,5	5	1	-	50	90	50	6	100/100	v32
v32_09	0,3	750	6	10	18	5	1	-	50	90	50	6	100/100	v32
v32_10	0,3	750	6	10	25	5	1	-	50	90	50	6	100/100	v32
v32_11	0,3	750	6	10	12,5	7	1	-	50	90	50	6	100/100	v32
v32_12	0,3	750	6	10	12,5	3	1	-	50	90	50	6	100/100	v32
v32_13	0,3	750	6	10	25	7	1	-	50	90	50	6	100/100	v32
v32_14	0,3	750	6	10	25	15	1	-	50	90	50	6	100/100	v32
v33_01	0,3	750	6	10	12,5	5	1	12,5	50	90	50	6	50/50	v33
v33_02	0,3	750	6	10	12,5	5	1	12,5	50	90	70	6	50/50	v33
v33_03	0,3	750	6	10	12,5	5	1	12,5	50	90	35	6	50/50	v33
v33_04	0,3	750	6	10	12,5	5	1	12,5	25	90	50	6	50/50	v33
v33_05	0,3	750	6	10	12,5	5	1	12,5	75	90	50	6	50/50	v33
v33_06	0,3	750	6	10	12,5	5	1	12,5	50	95	50	6	50/50	v33
v33_07	0,3	750	6	10	12,5	5	1	12,5	50	70	50	6	50/50	v33
v33_08	0,3	750	6	10	12,5	5	1	12,5	50	90	50	6	100/100	v33
v33_09	0,3	750	6	10	18	5	1	18	50	90	50	6	100/100	v33
v33_10	0,3	750	6	10	25	5	1	25	50	90	50	6	100/100	v33
v33_11	0,3	750	6	10	12,5	7	1	12,5	50	90	50	6	100/100	v33
v33_12	0,3	750	6	10	12,5	3	1	12,5	50	90	50	6	100/100	v33
v33_13	0,3	750	6	10	25	7	1	25	50	90	50	6	100/100	v33
v33_14	0,3	750	6	10	25	15	1	25	50	90	50	6	100/100	v33
v33_15	0,3	750	6	10	25	5	1	50	42	90	37	6	100/100	v33
v33_16	0,3	750	6	10	12,5	5	1	12,5	50	90	50	10	50/50	v33
v33_17	0,3	750	6	10	12,5	5	1	12,5	50	90	50	14	50/50	v33
v33_18	0,3	750	6	10	12,5	5	1	12,5	50	90	50	3	50/50	v33

## A.2 Parametersets

## A.3 Abbildungen

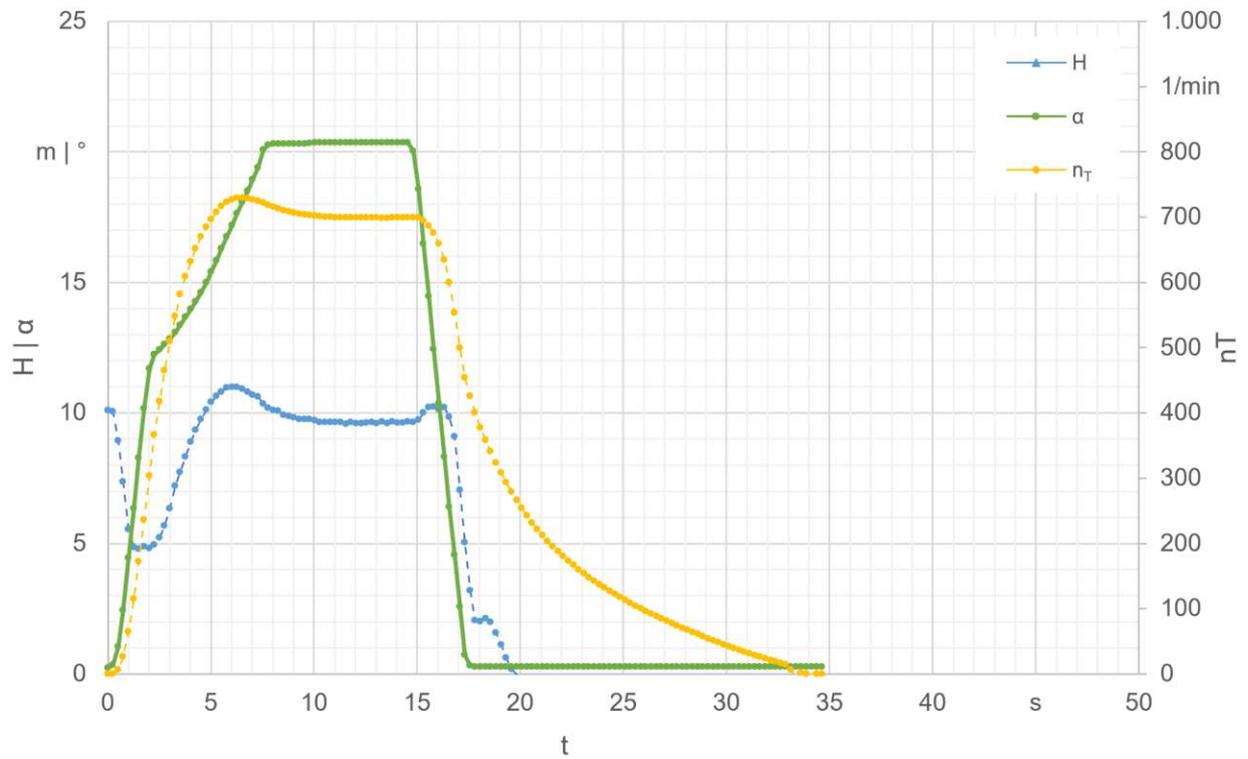


Abbildung A.3: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32\_01

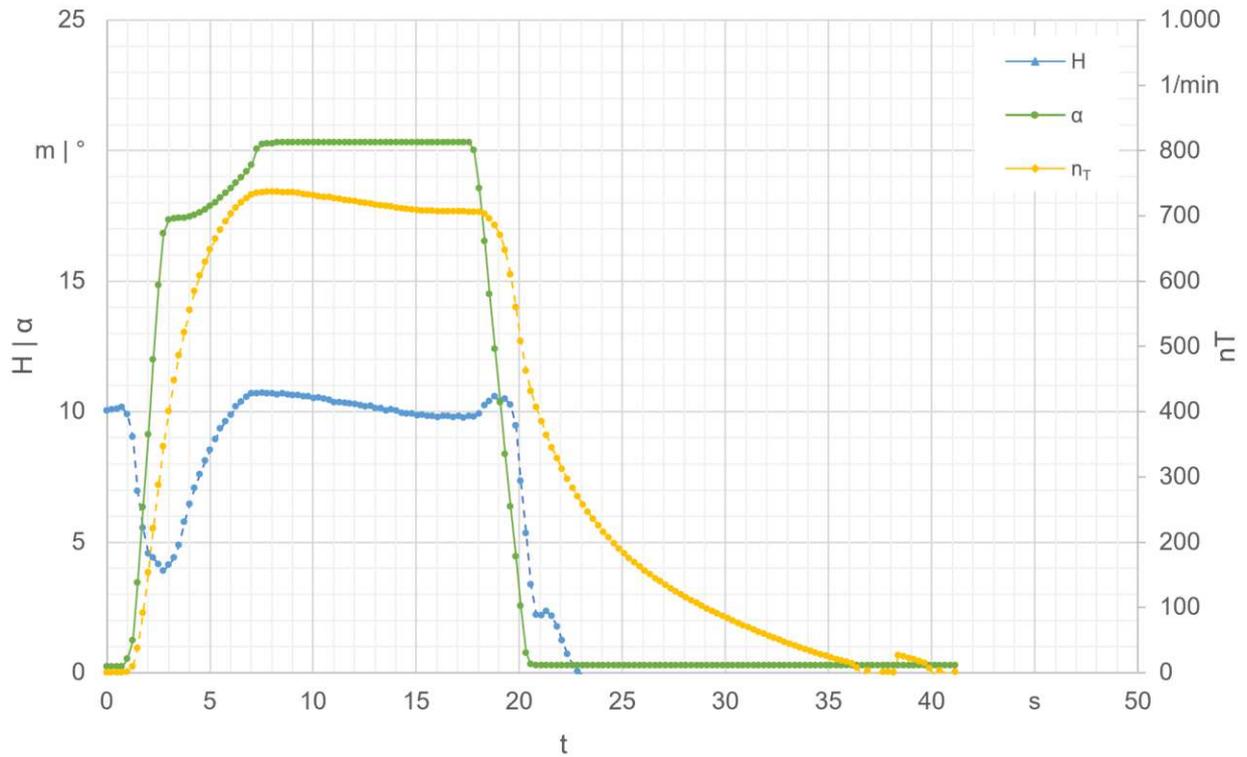


Abbildung A.4: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32\_02

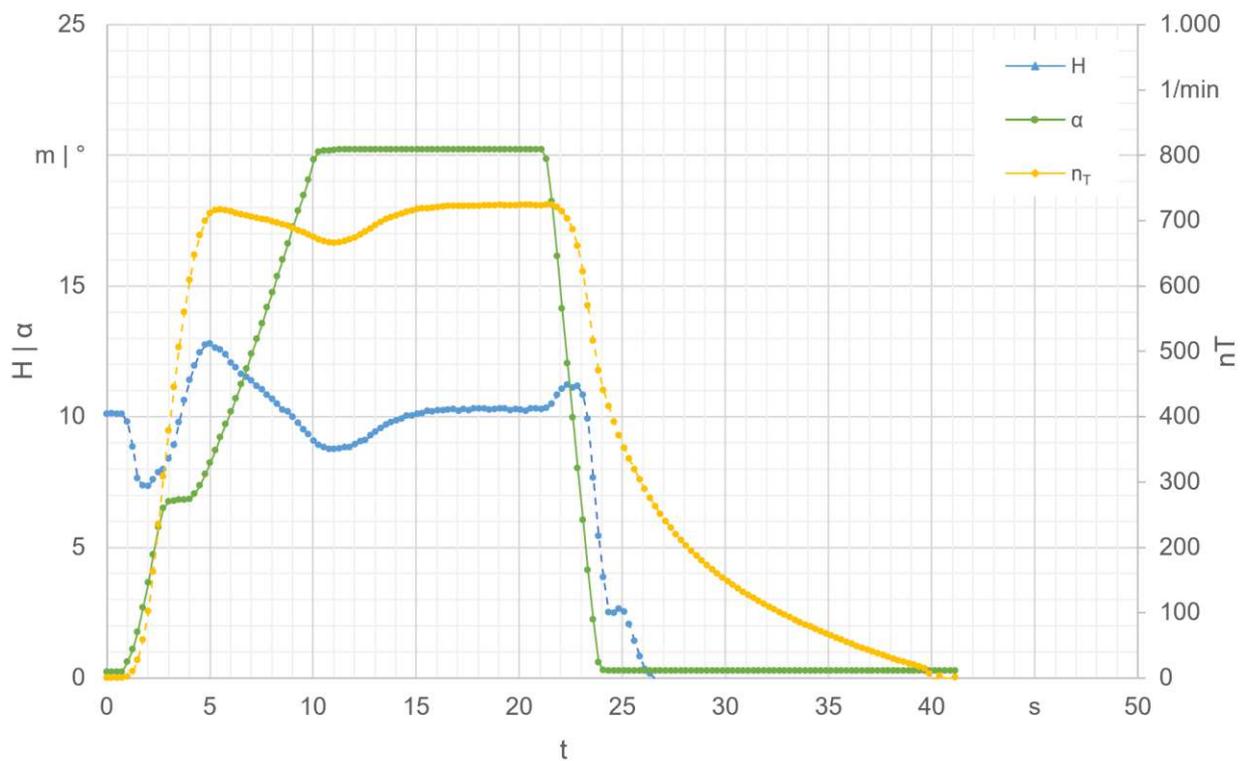


Abbildung A.5: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32\_03

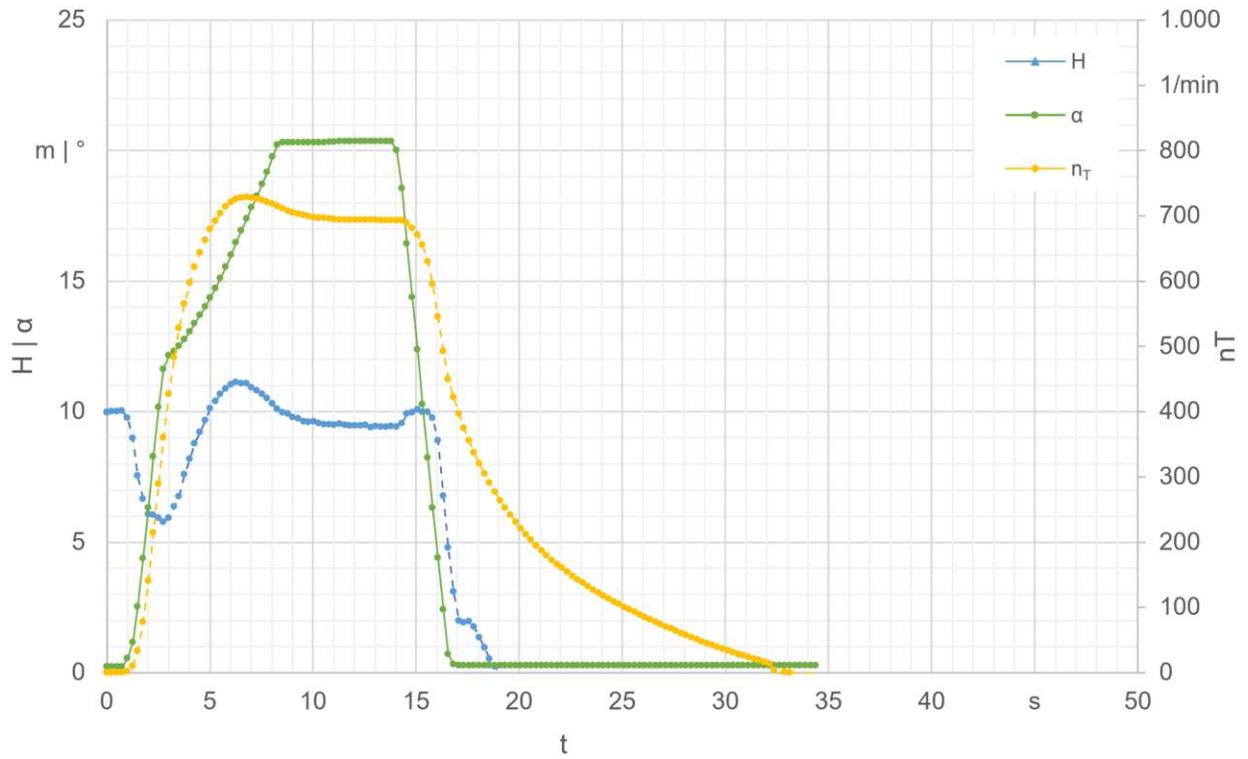


Abbildung A.6: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32\_04

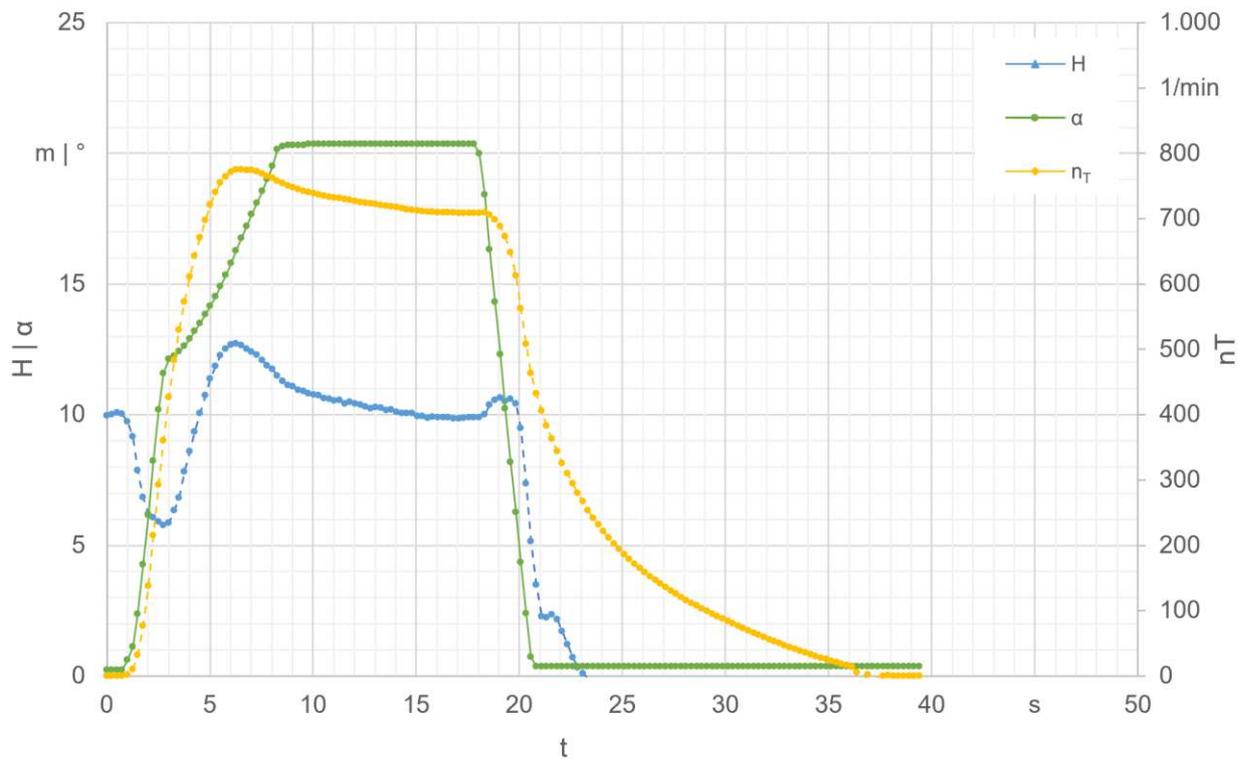


Abbildung A.7: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32\_05

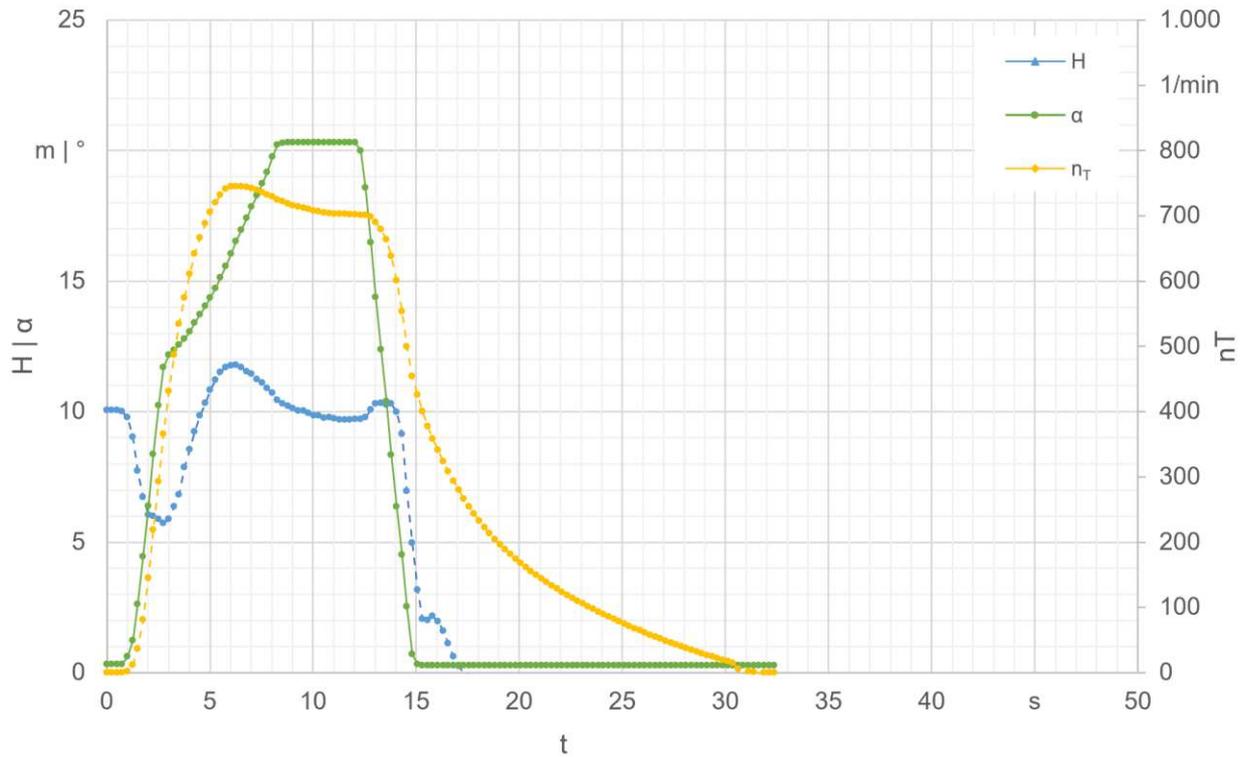


Abbildung A.8: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32\_06

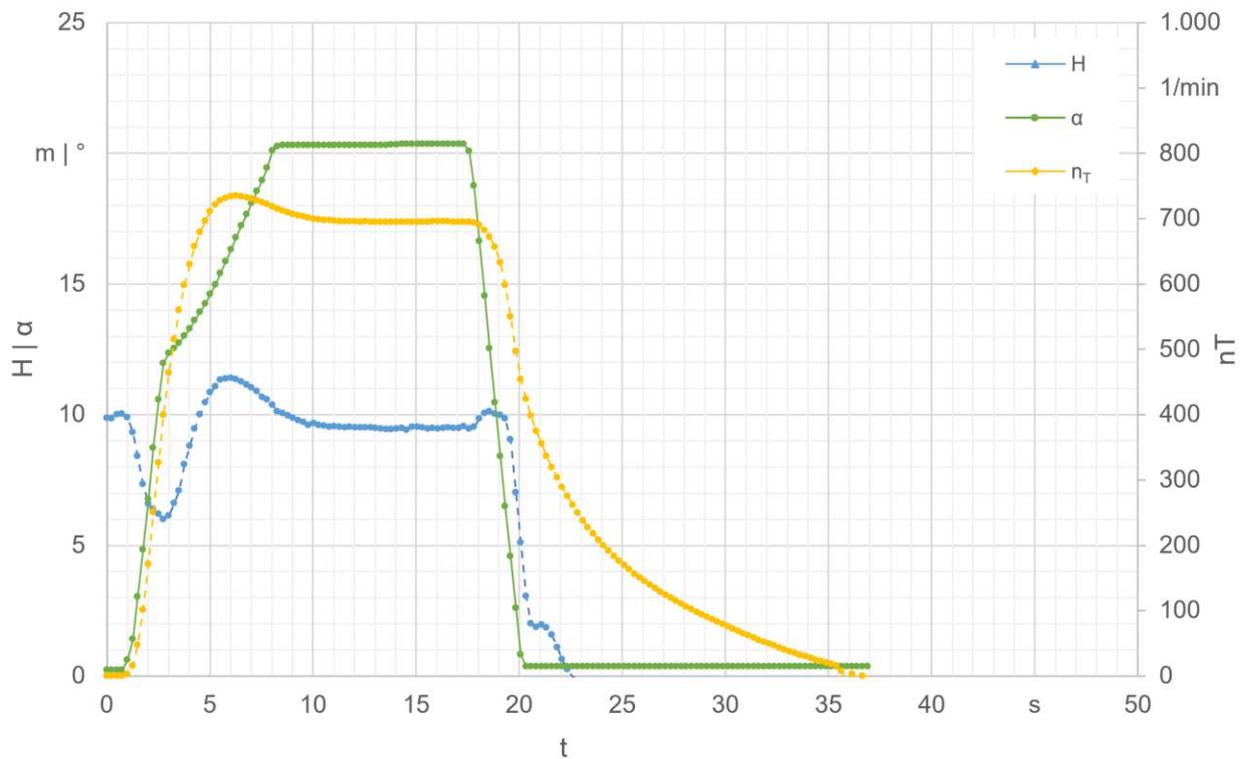


Abbildung A.9: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32\_07

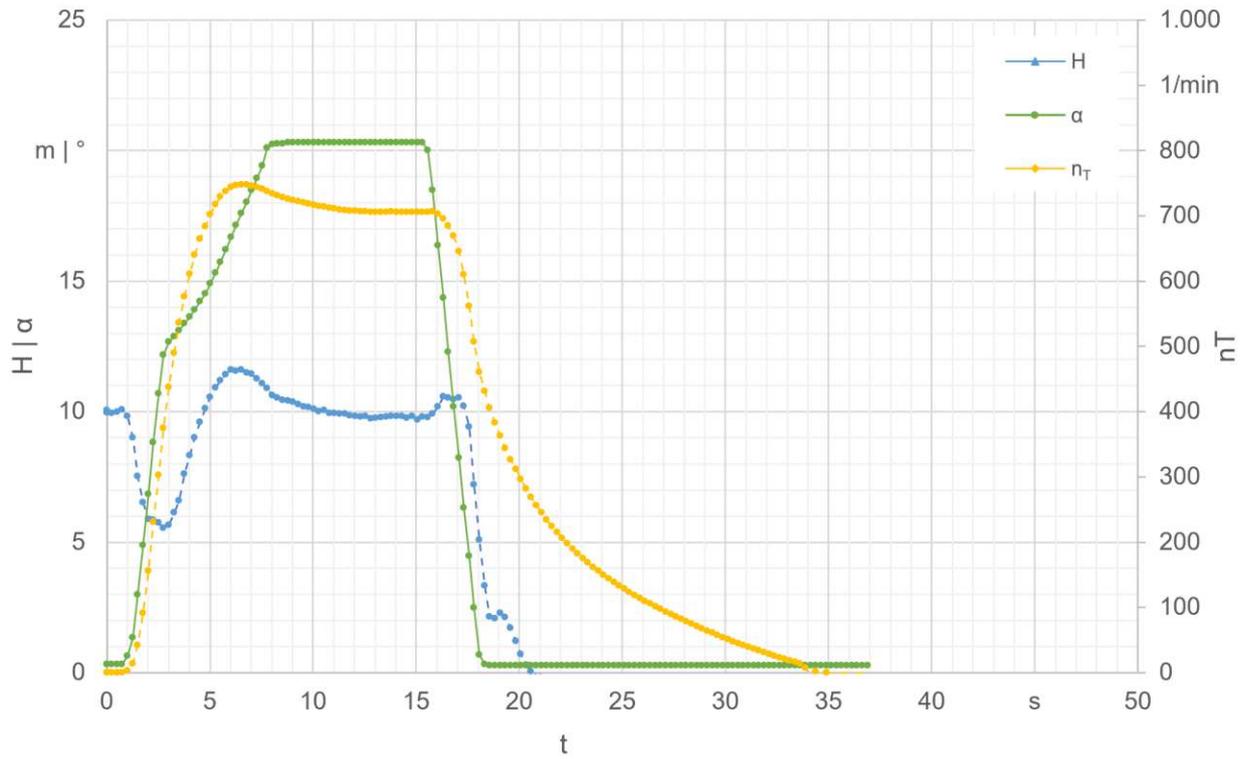


Abbildung A.10: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32\_08

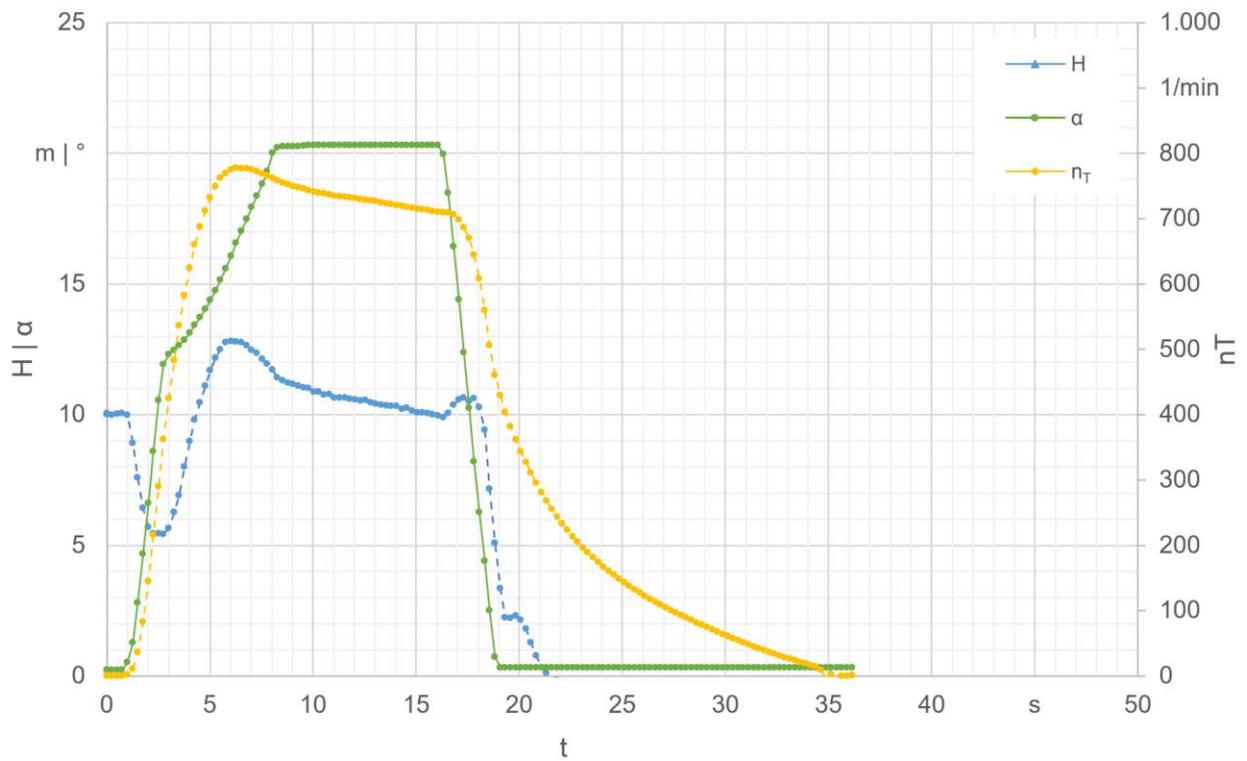


Abbildung A.11: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32\_09

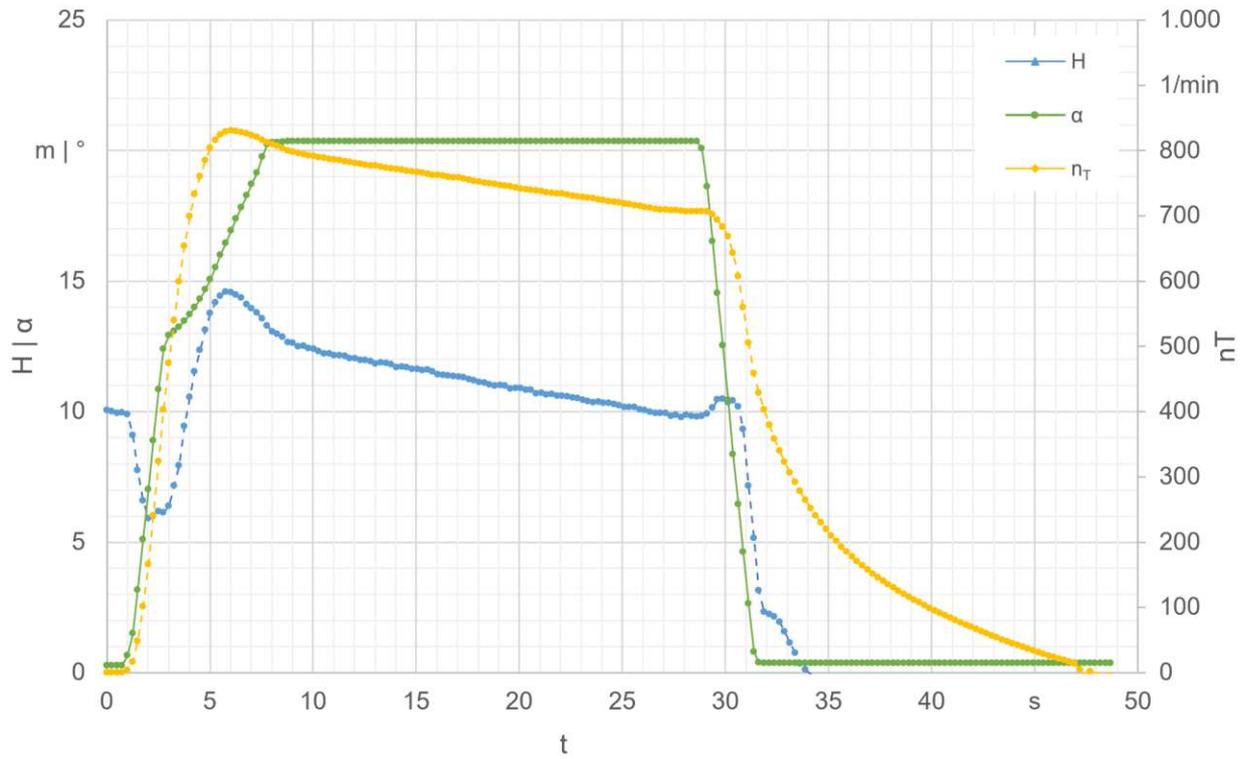


Abbildung A.12: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32\_10

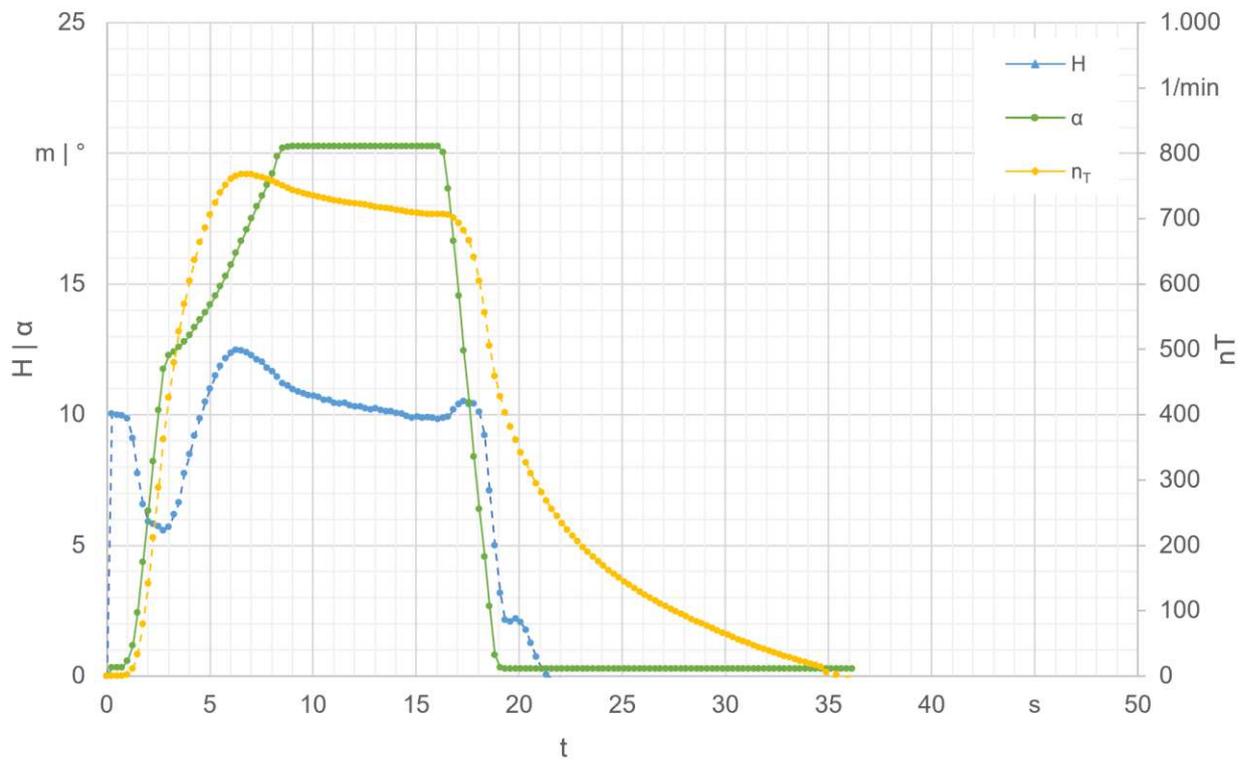


Abbildung A.13: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32\_11

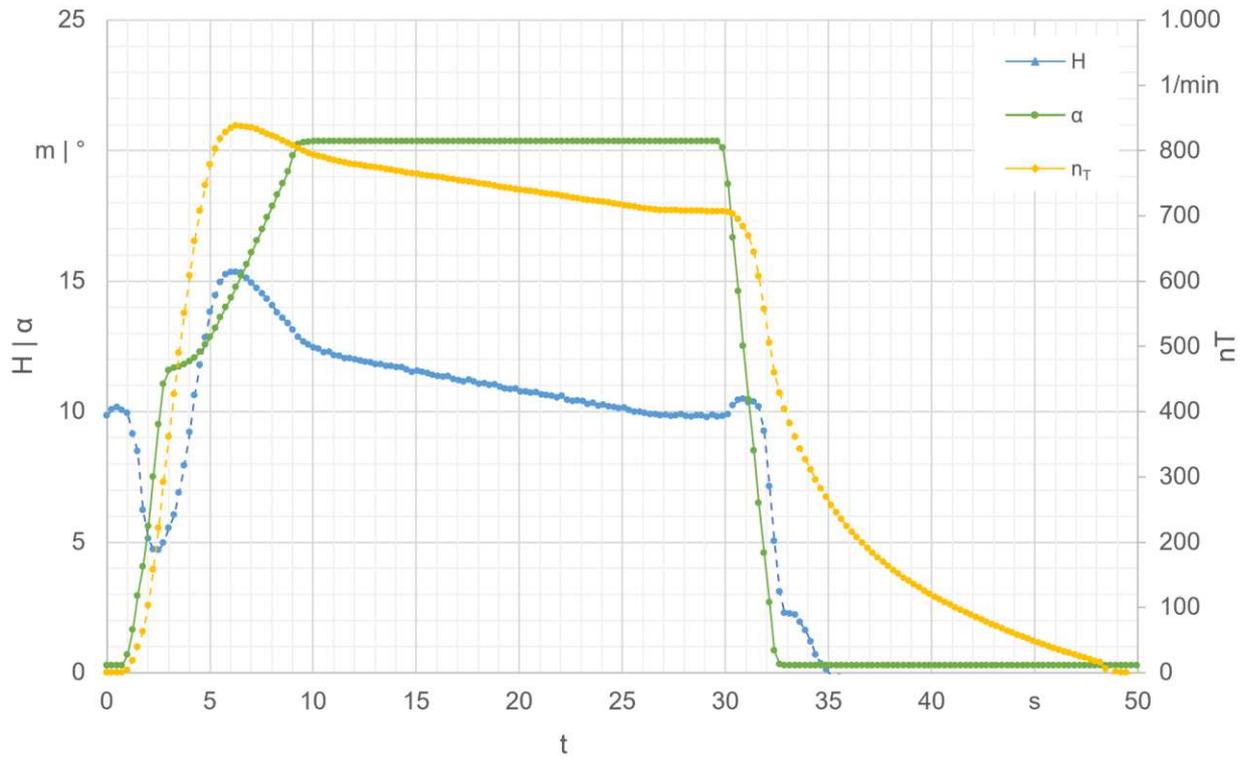


Abbildung A.14: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32\_12

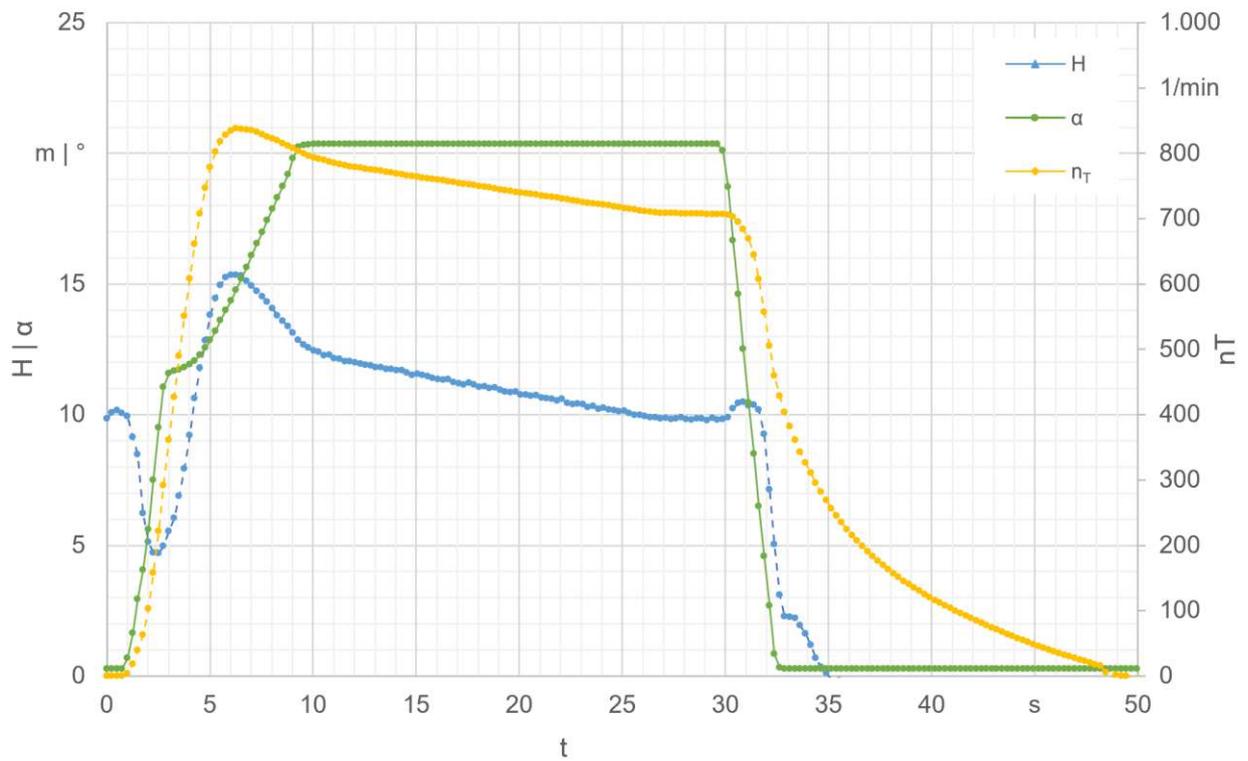


Abbildung A.15: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32\_13

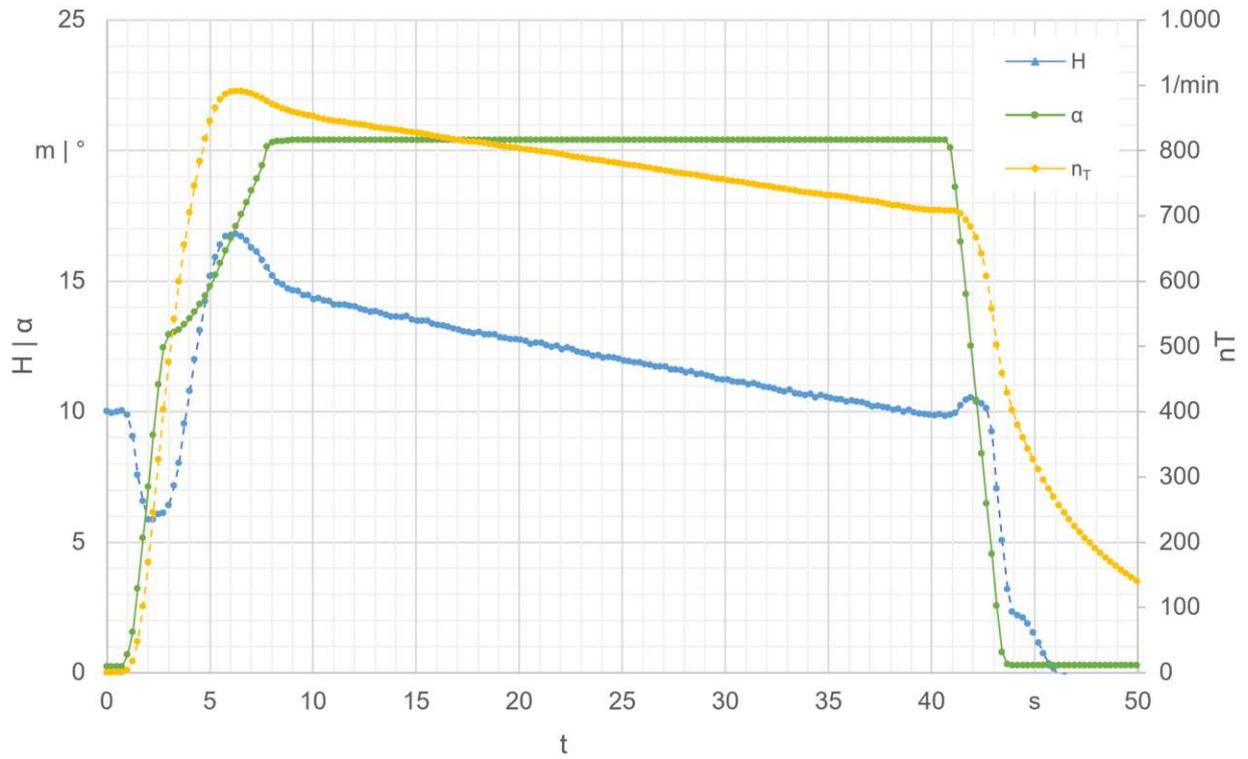


Abbildung A.16: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v32\_14

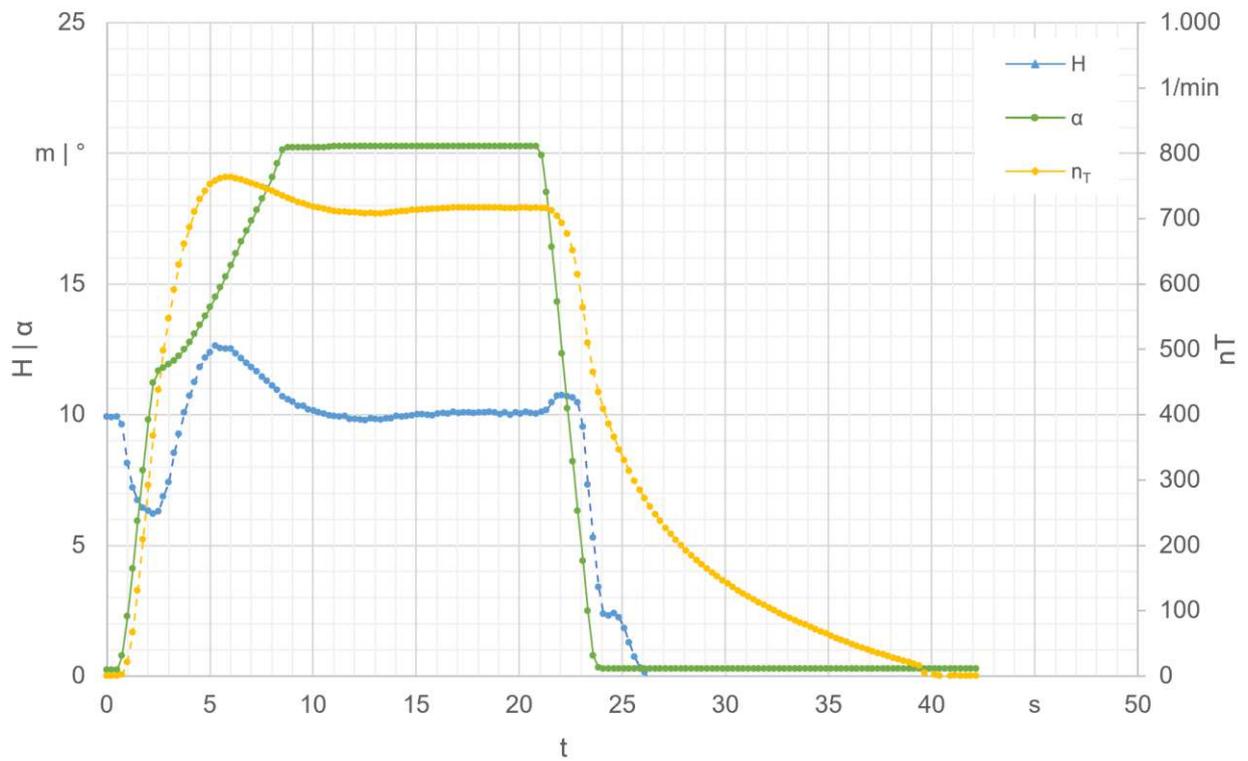


Abbildung A.17: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_01

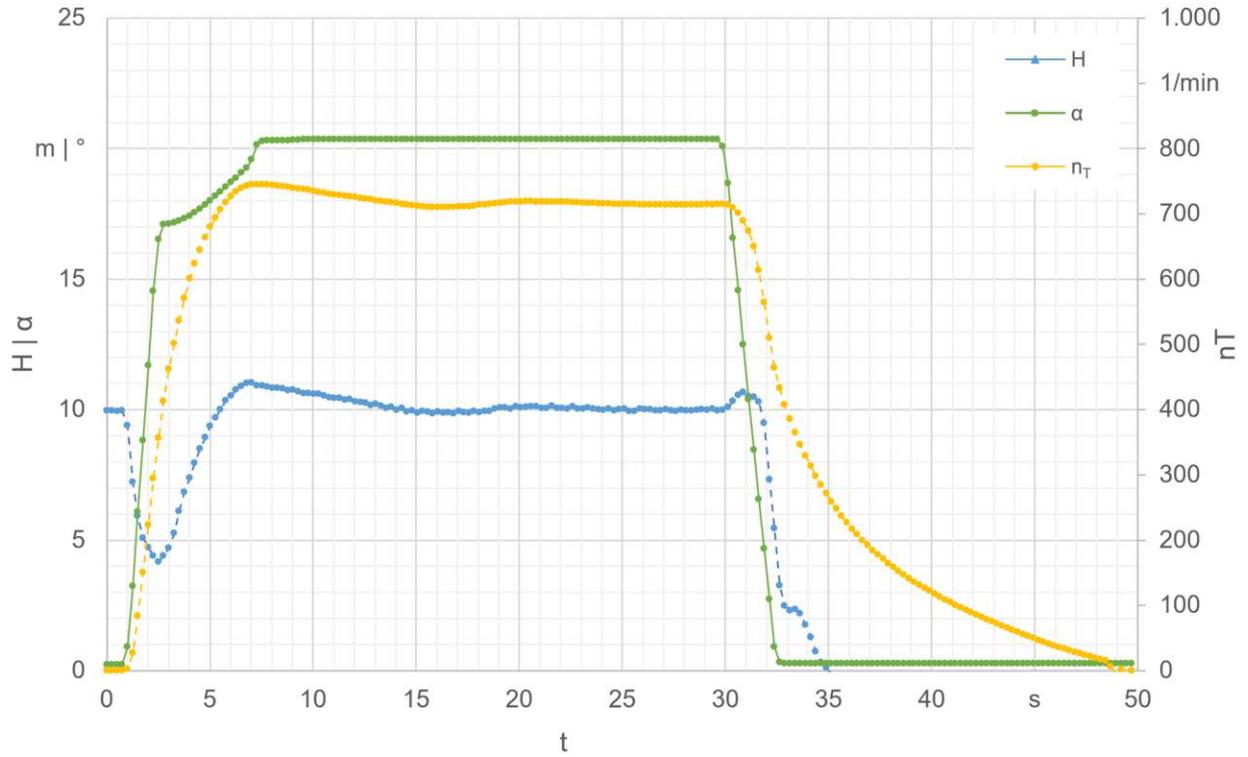


Abbildung A.18: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_02

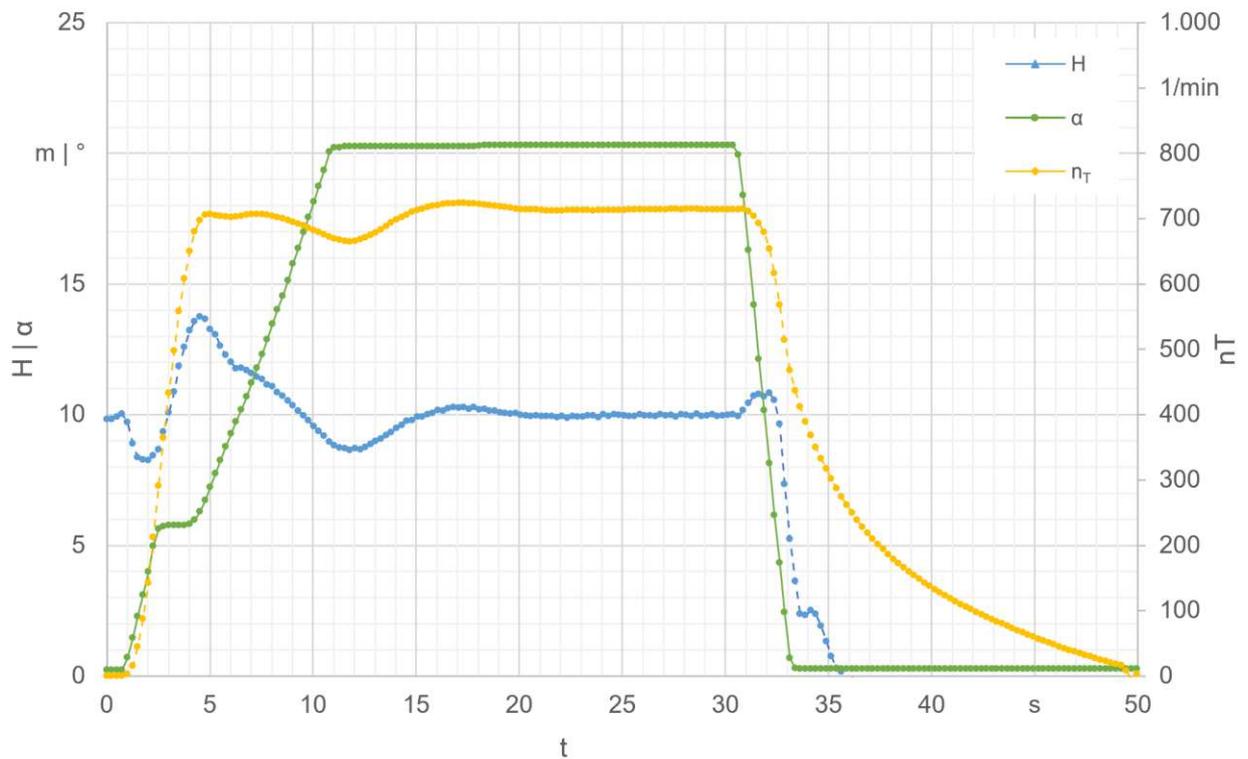


Abbildung A.19: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_03

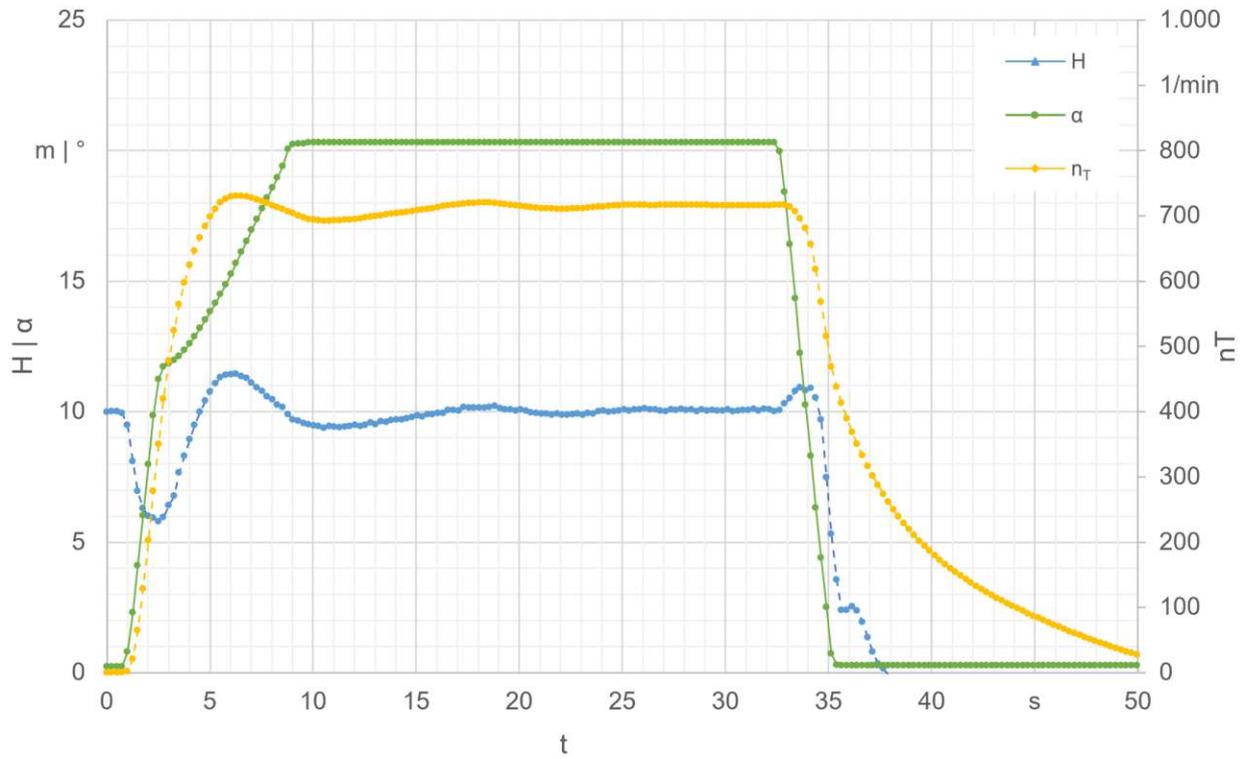


Abbildung A.20: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_04

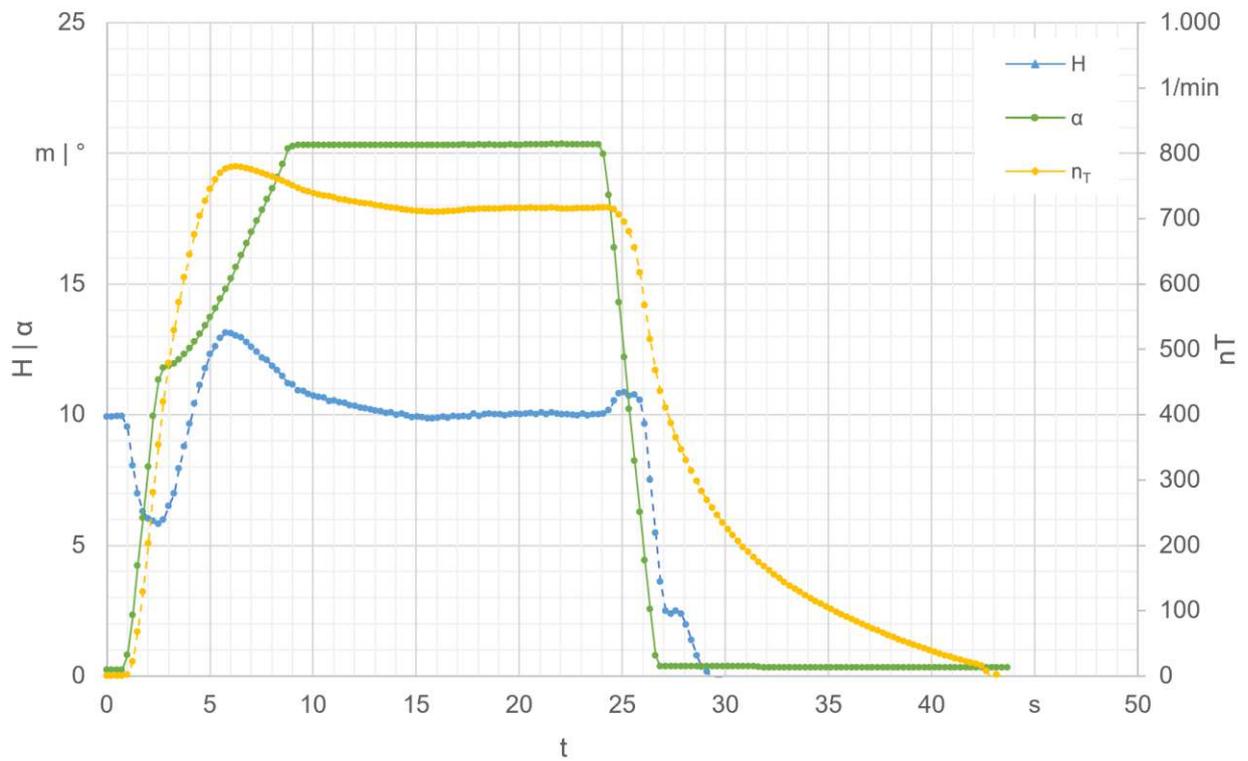


Abbildung A.21: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_05

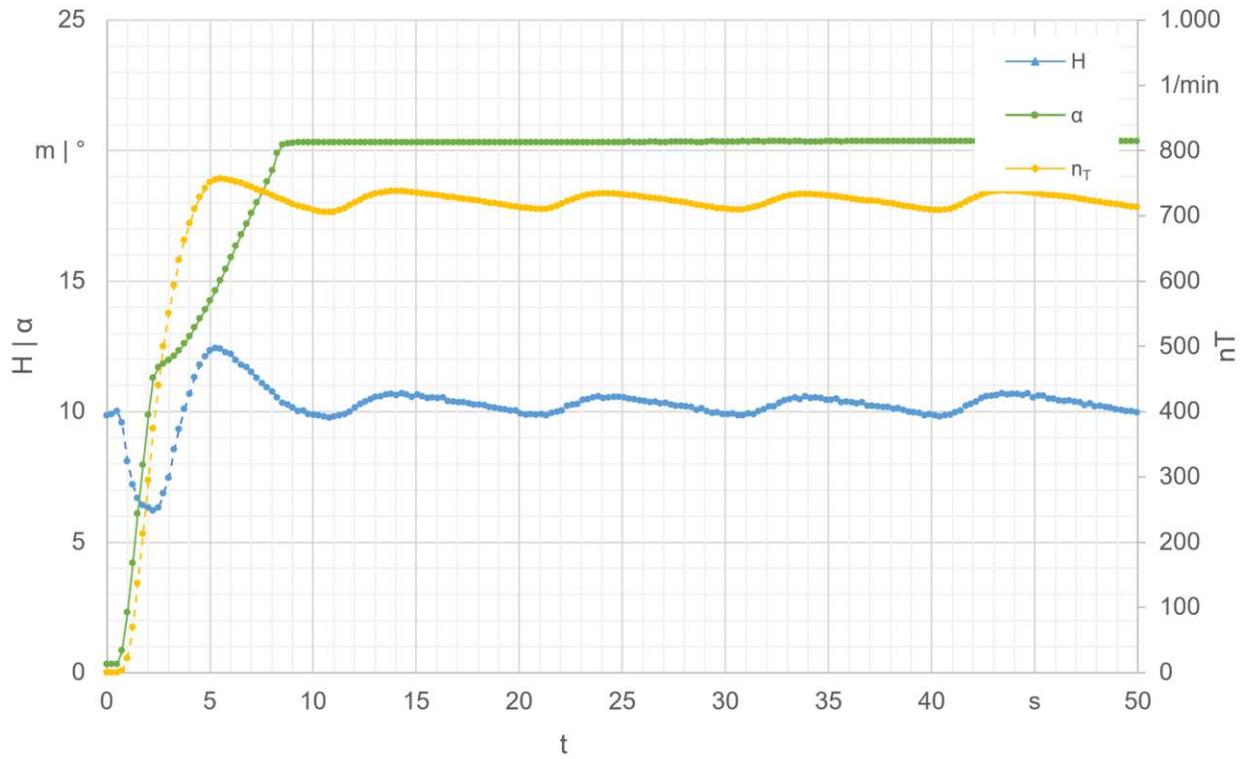


Abbildung A.22: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_06

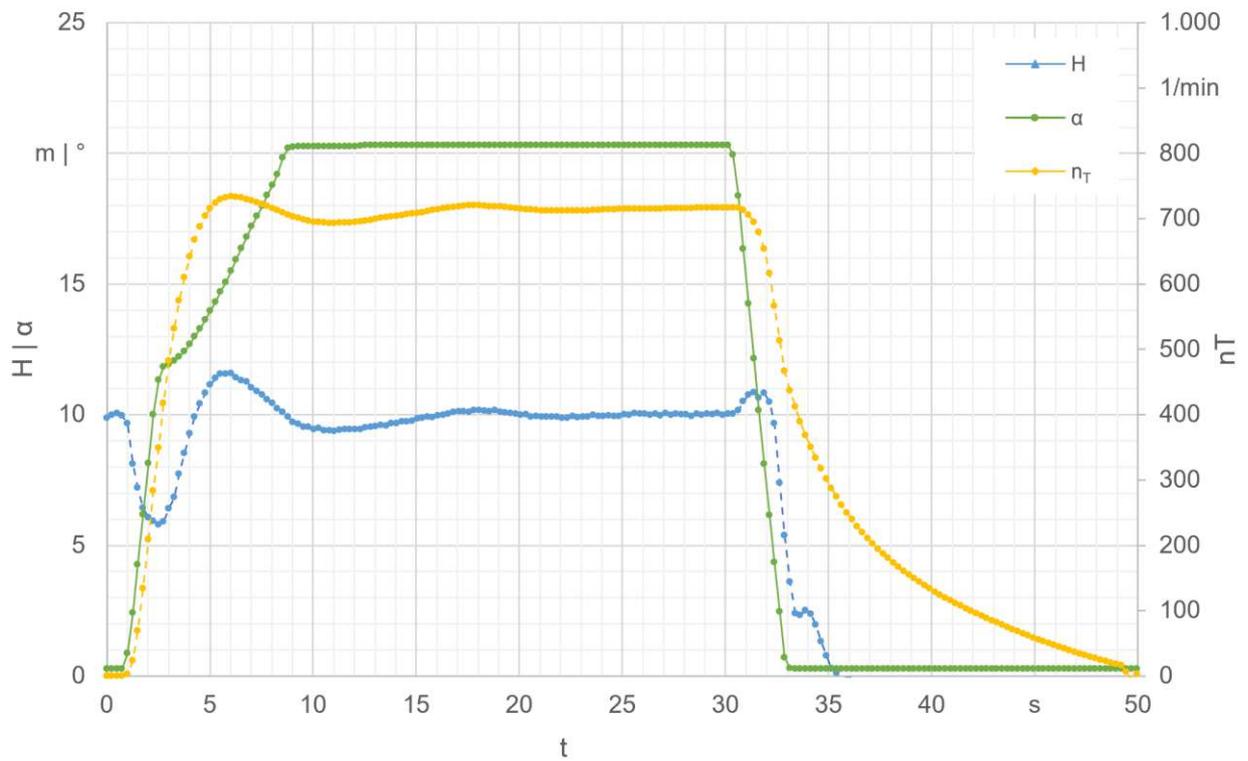


Abbildung A.23: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_07

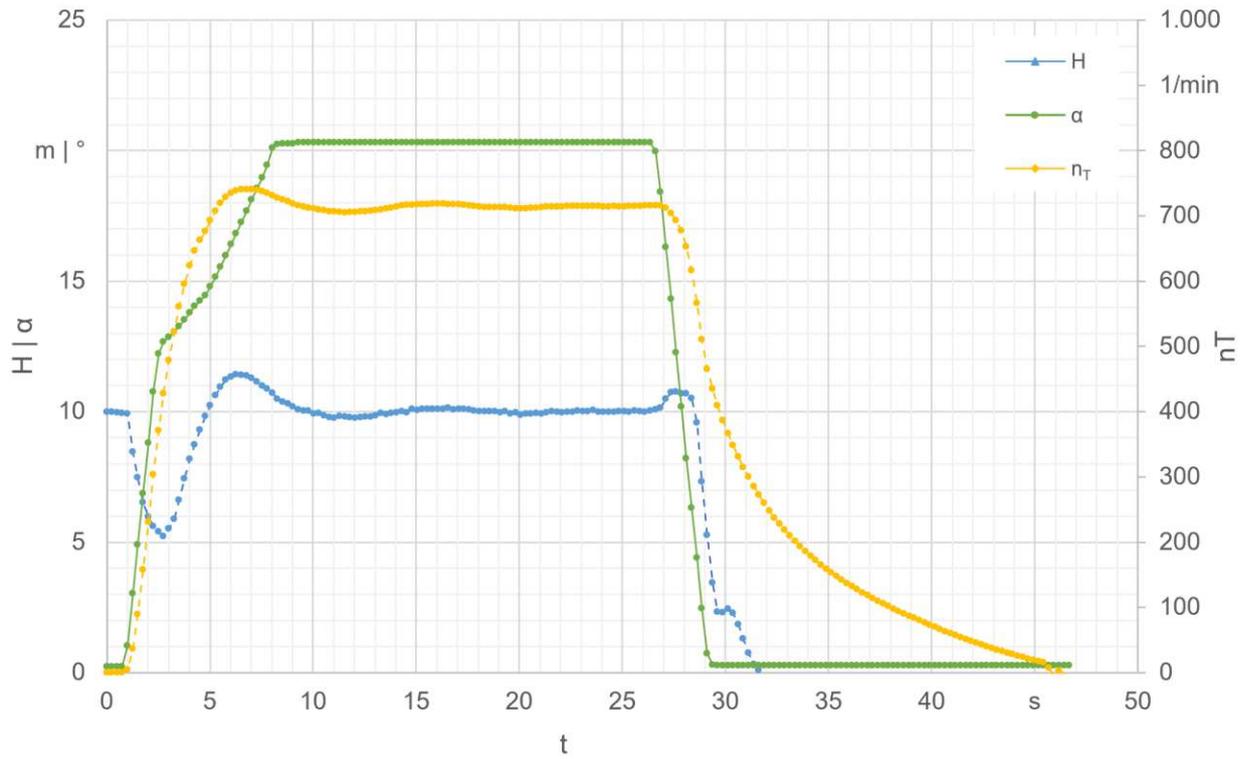


Abbildung A.24: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_08

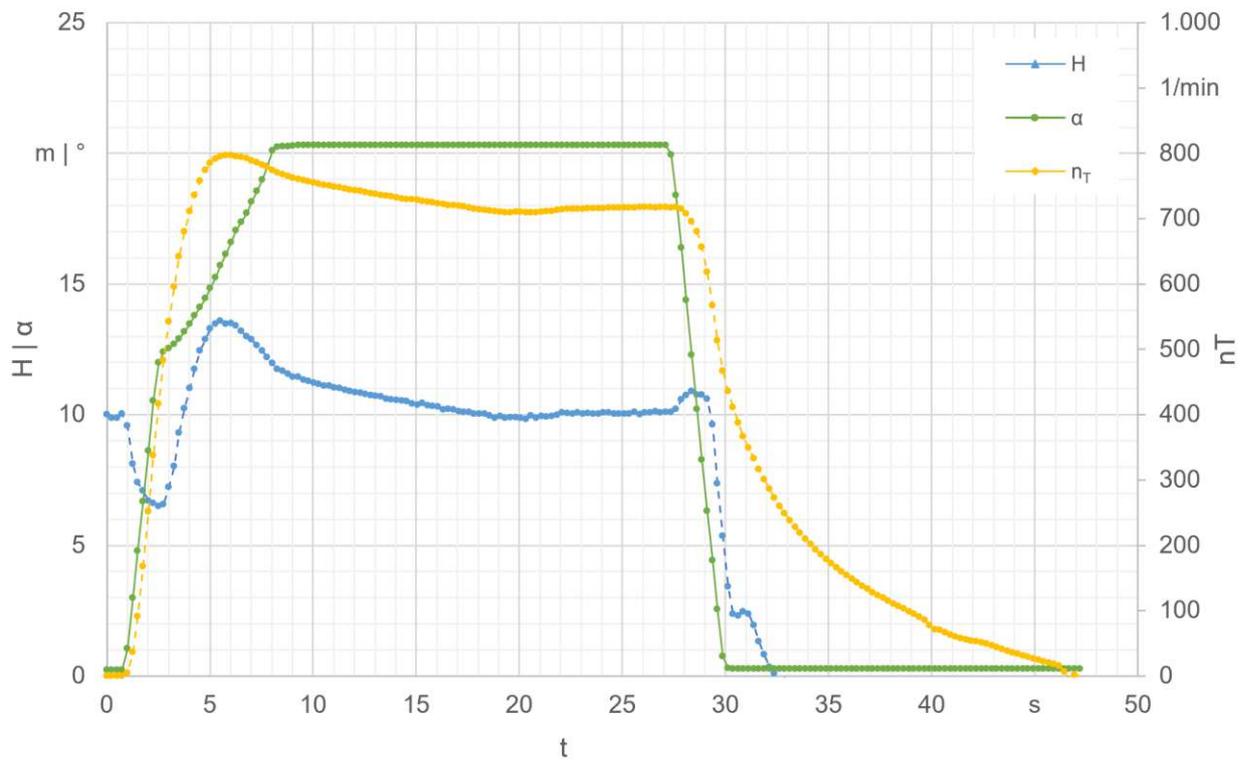


Abbildung A.25: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_09

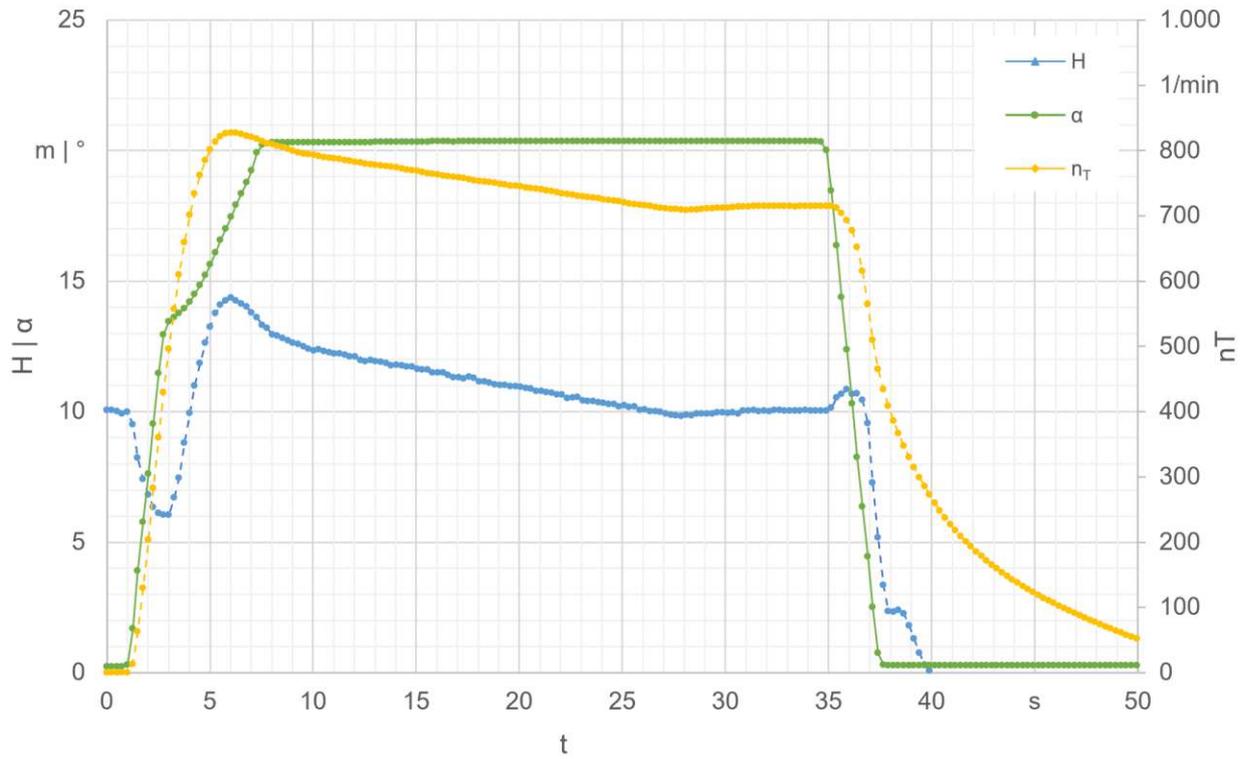


Abbildung A.26: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_10

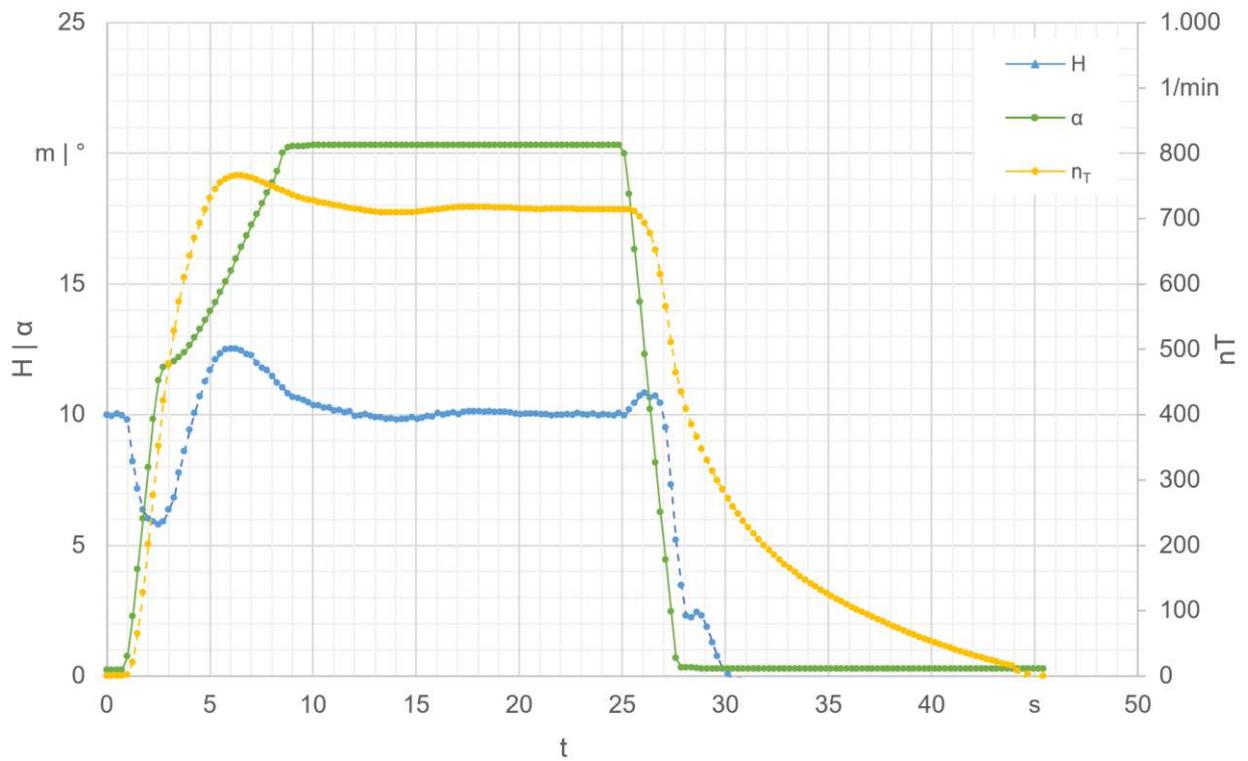


Abbildung A.27: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_11

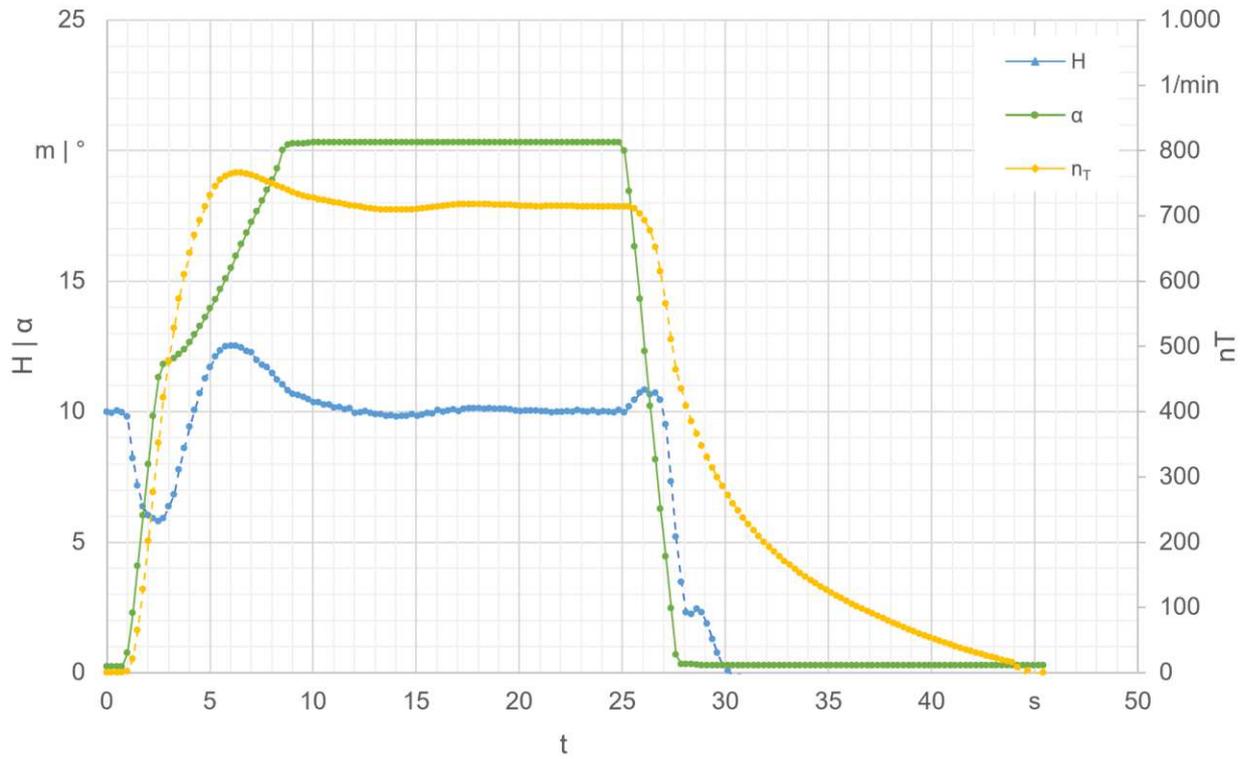


Abbildung A.28: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_11

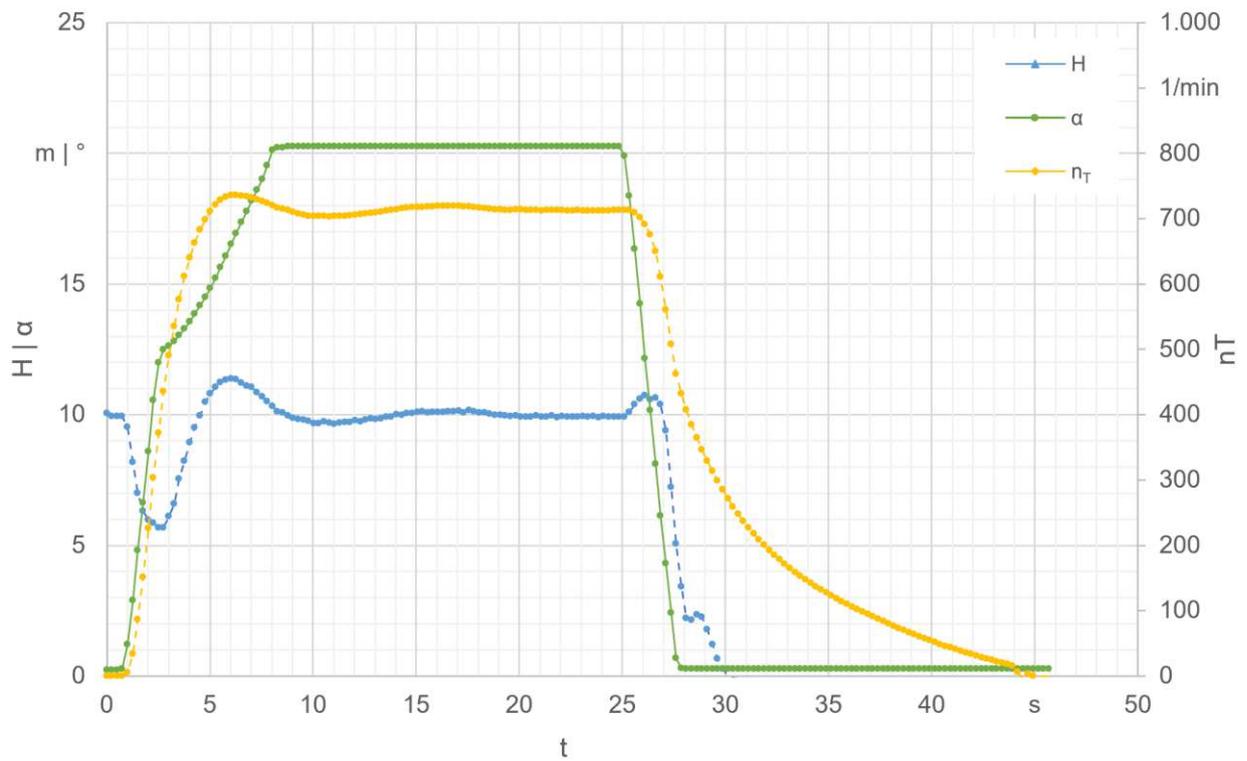


Abbildung A.29: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_12

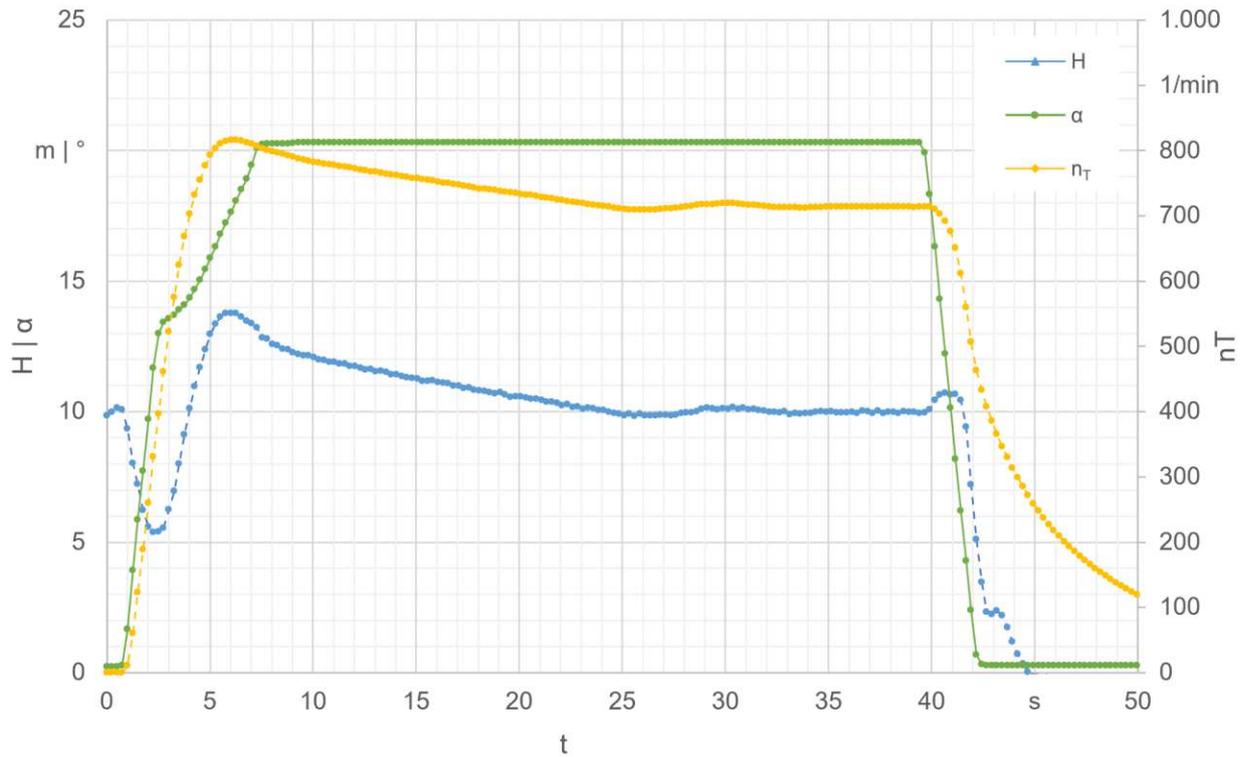


Abbildung A.30: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_13

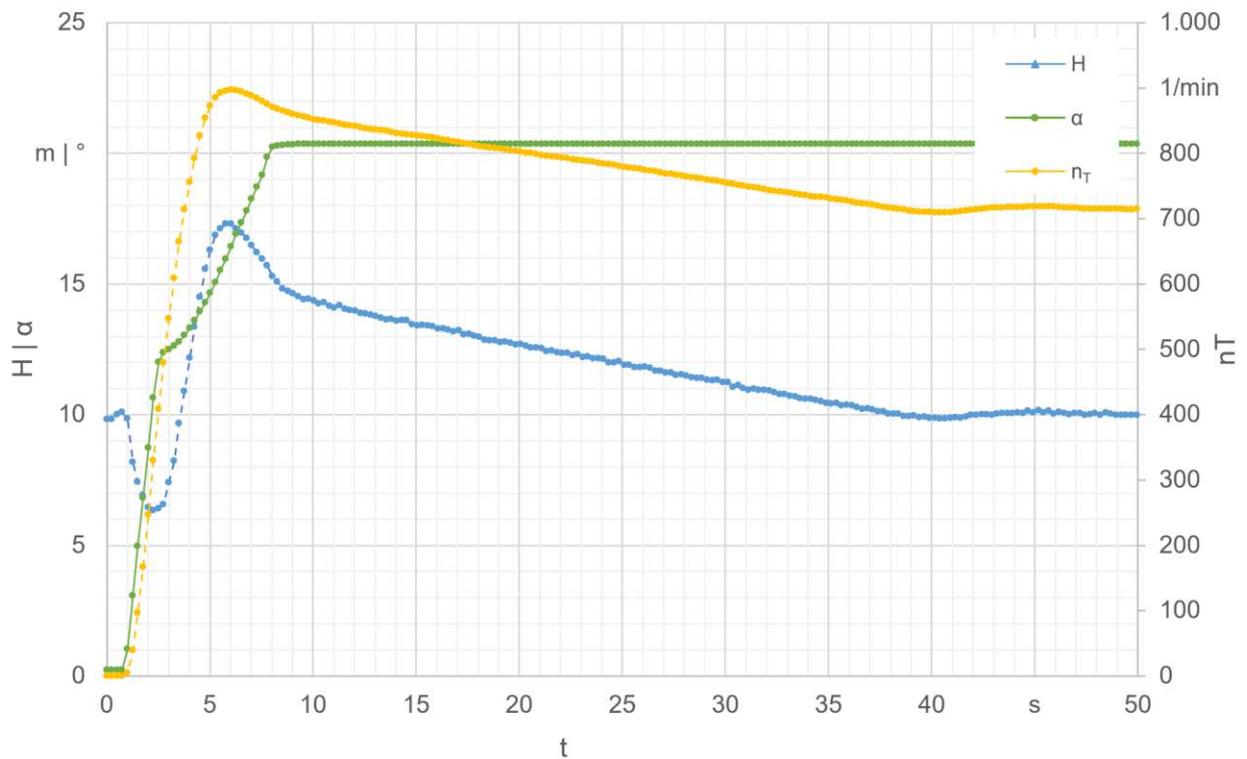


Abbildung A.31: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_14

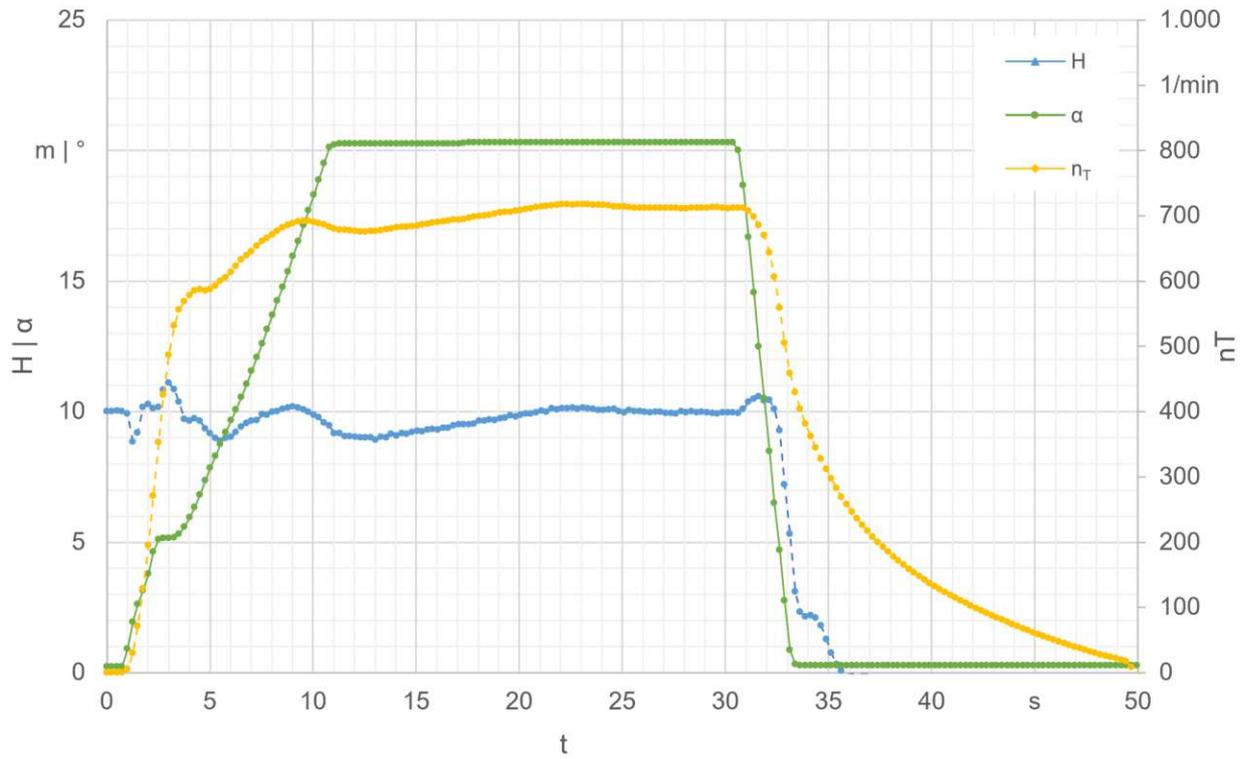


Abbildung A.32: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_15

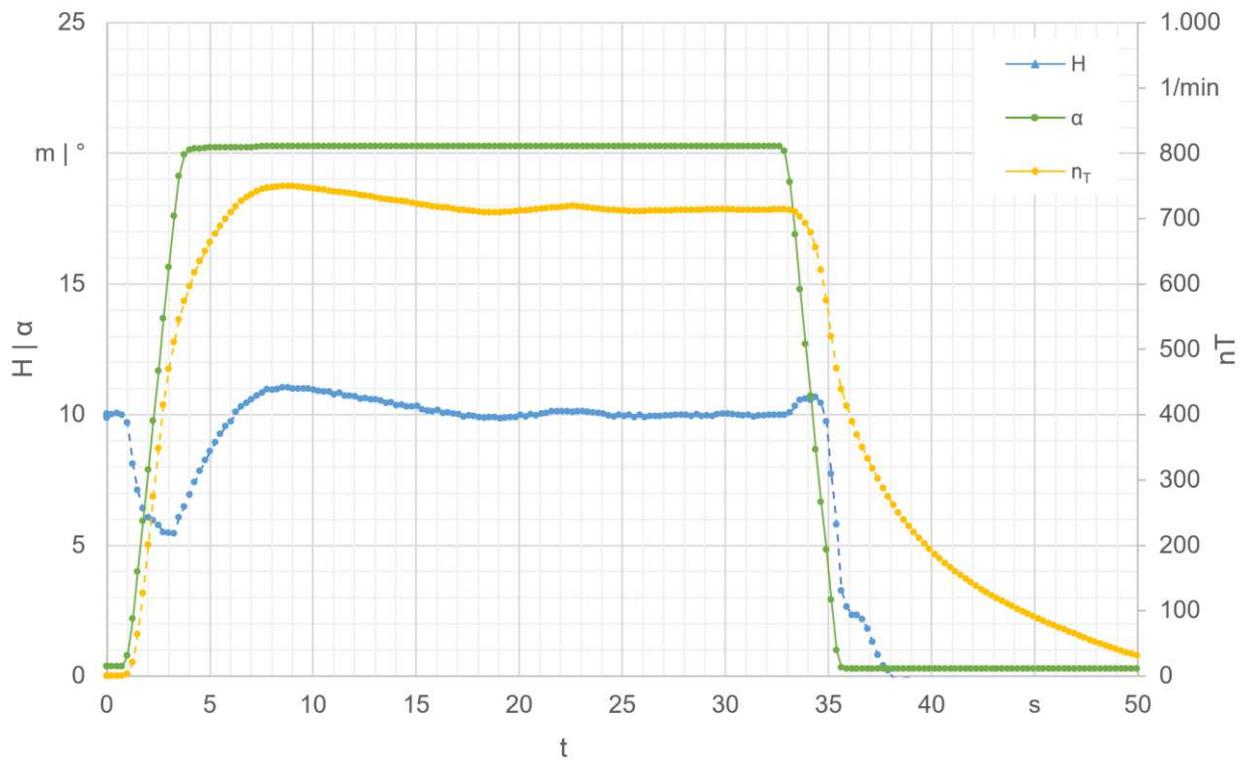


Abbildung A.33: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_16

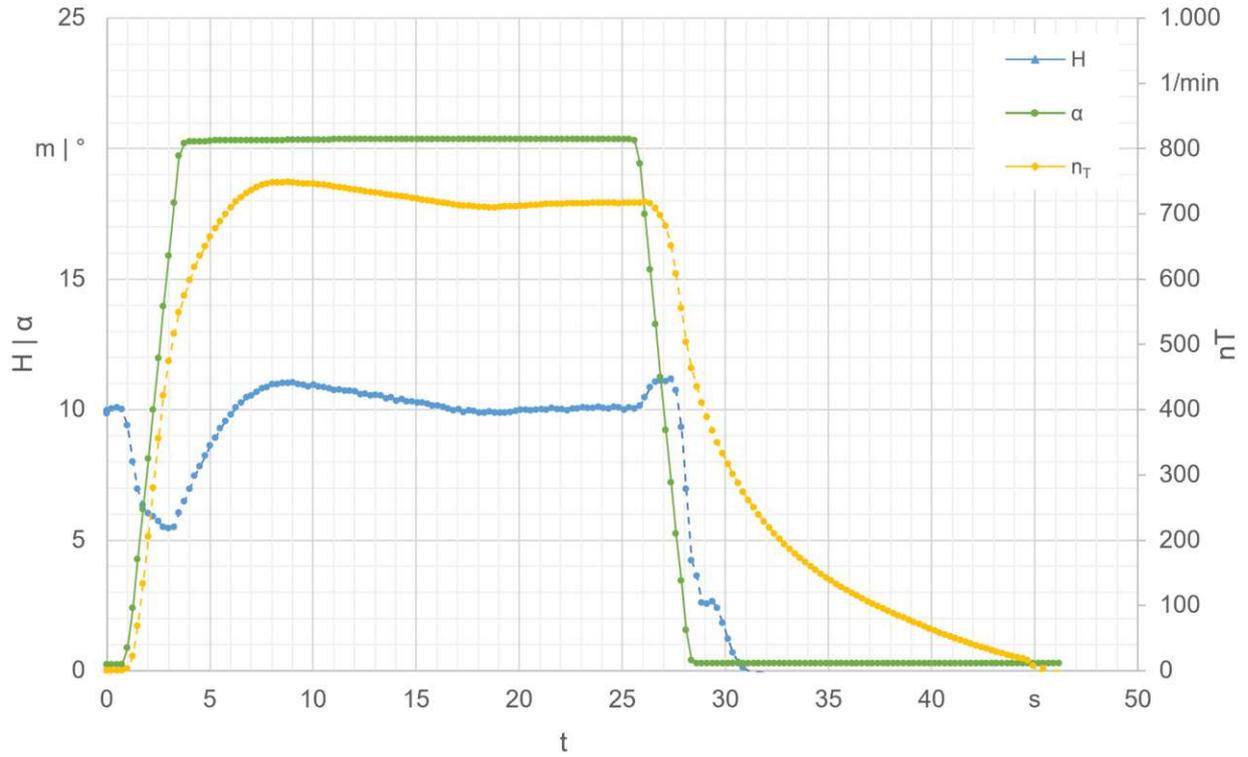


Abbildung A.34: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_17

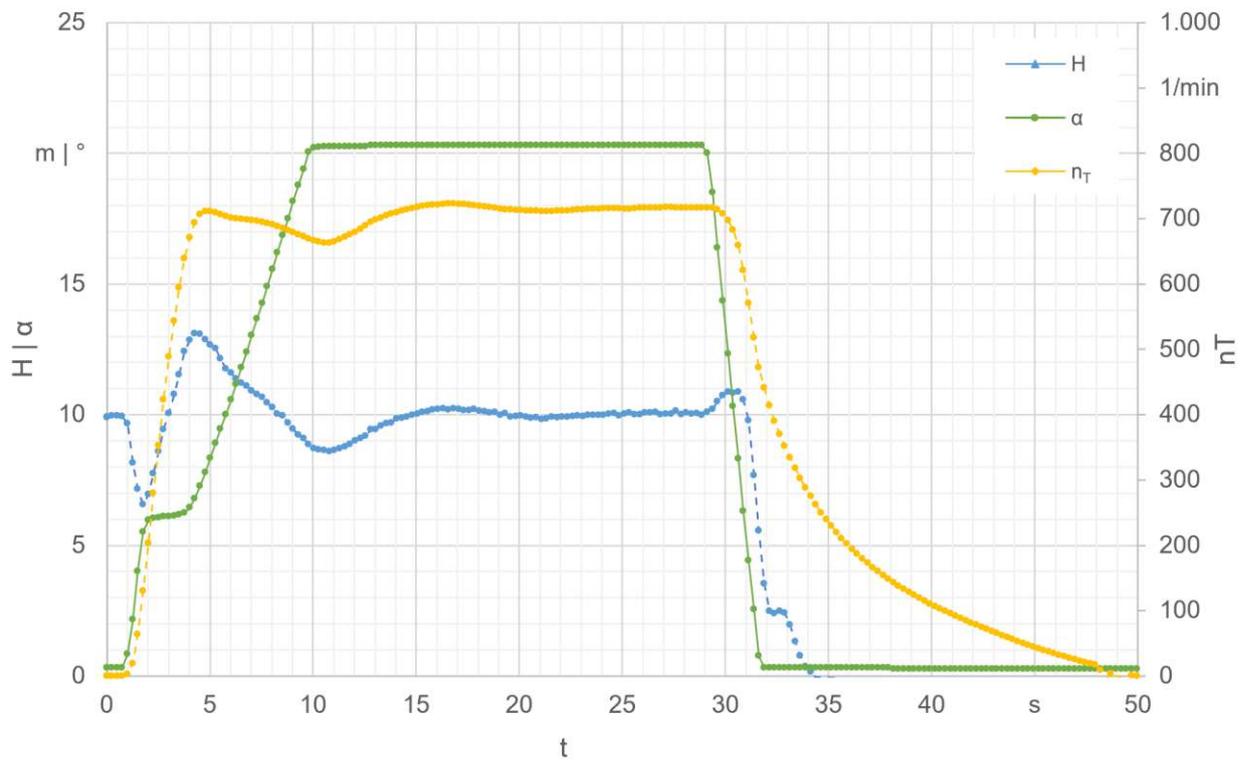


Abbildung A.35: Grafische Darstellung für einen Anfahrvorgang mit Parameterset v33\_18