

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství
Studijní specializace: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Rešerše experimentálních metod pro měření vlhkosti páry pomocí optických sond v parních turbínách

Autor: Matěj RANŠ
Vedoucí práce: prof. Ing. Václav URUBA, CSc.

Akademický rok 2022/2023

Zadání

Úkolem pro studenta bude provést rešerši odborných článků a knih, zabývajících se popisem experimentálních metod pro měření vlhkosti s pomocí optických sond.

Dílejší úkoly budou vypadat takto:

1. V první fázi student zdůvodní nutnost měření vlhkosti páry pomocí optických sond v parních turbínách.
2. V druhé fázi student provede rešerši, týkající experimentálních metod pro měření primárních vodních kapek (kapek o průměru do cca 1 μm) pomocí optických sond, bude proveden přehled pracovišť, používajících optické metody.
3. V další části práce bude provedena rešerše, týkající se dostupných experimentálních metod pro měření hrubé vodní fáze (kapky nad cca 1 μm) opět pomocí optických sond. I zde budou přehledně shrnuta pracoviště, ve kterých se dané experimentální metody využívají.
4. Na závěr budou porovnány výhody a nevýhody jednotlivých typů sond a bude provedeno přehledné shrnutí získaných výsledků.

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce panu prof. Ing. Václavu Urubovi, Csc. a konzultantovi panu doc. Ing. Michalu Hoznedlovi, Ph. D. za cenné rady a pomoc při vypracování bakalářské práce.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Ranš	Jméno Matěj	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) prof. Ing. Uruba, CSc.	Jméno Václav	
PRACOVISŤE	ZČU – FST – KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Rešerše experimentálních metod pro měření vlhkosti páry pomocí optických sond v parních turbínách		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN

CELKEM	61	TEXTOVÁ ČÁST	33	GRAFICKÁ ČÁST	28
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS	Práce se zabývá optickými metodami pro měření vlastností kapalně fáze (velikost kapek, množství kapek, rychlost a směr kapek) v parní turbíně. V práci jsou popsány a porovnány metody pro měření malých, primárních kapek (například extinkční metoda) a metody pro měření větších, sekundárních kapek (například metoda stínografie). V závěru práce jsou konkrétně popsány vyvinuté sondy pro měření v parních turbínách a pracoviště, zabývající se experimentálním výzkumem kapalně fáze v parních turbínách.
KLÍČOVÁ SLOVA	parní turbína, vlhkost páry, vodní kapky, eroze lopatek, primární kapky, sekundární kapky, optické metody, sondy pro parní turbíny

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Ranš	Name Matěj	
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) prof. Ing. Uruba, CSc.	Name Václav	
INSTITUTION	ZČU – FST – KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Research on experimental methods for wet steam measurements inside steam turbines with optical probes		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KKE	SUBMITTED IN	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	61	TEXT PART	33	GRAPHICAL PART	28
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION	This thesis deals with optical methods for measuring liquid phase properties (droplet size, droplet quantity, droplet velocity and direction) in a steam turbine. Methods for measuring small, primary droplets (e.g., the extinction method) and methods for measuring larger, secondary droplets (e.g., the shadowgraphy method) are described and compared. A description of designs of probes that have already been developed follows. The thesis concludes with a short description of active research groups in this field.
KEY WORDS	steam turbine, steam wetness, water droplets, blade erosion, fine droplets, coarse droplets, optical methods, probes for steam turbines

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	9
Seznam obrázků	11
1 Úvod.....	13
2 Historie.....	14
3 Carnotizace R-C cyklu	15
4 Kapalná fáze v PT	16
4.1 Vznik primárních kapek	16
4.2 Vznik sekundárních kapek.....	16
4.3 Ztráty vlivem kapalné fáze	17
4.4 Eroze vlivem kapalné fáze.....	18
4.5 Ochrany proti erozi.....	19
4.5.1 Pasivní ochrany	19
4.5.2 Aktivní ochrana	19
5 Optické metody měření vlhkosti	20
5.1 Metody zachycení obrazu.....	20
5.1.1 Photography	20
5.1.2 Holography.....	24
5.2 Metody na principu rozptylu světla a difrakce	25
5.2.1 Teorie difrakce a rozptylu světla.....	25
5.2.2 Diffractometry	26
5.2.3 Interferometric particle imaging.....	27
5.2.4 Phase doppler particle analyser	28
5.2.5 Light scattering.....	29
5.2.6 Extinction	33
5.2.7 Light fluctuation method.....	35
5.2.8 Polarization.....	36
5.3 Porovnání jednotlivých metod.....	36
5.3.1 Porovnání metod pro primární kapky.....	37
5.3.2 Porovnání metod pro sekundární kapky.....	38
5.4 Další metody měření velikosti částic.....	39
6 Pracoviště zabývající se optickými sondami.....	39
6.1 Vývoj sond.....	39
6.1.1 USST v Šanghaji	40
6.1.2 ETH Zürich	41

6.1.3	ITSM na Univerzitě v Stuttgartu	42
6.1.4	CKTI v Petrohradu	44
6.1.5	Ústav energetiky na ČVUT	46
6.1.6	EDF (Francie).....	47
6.1.7	Anglie (Alstom Power Ltd, University of Nottingham)	49
6.1.8	IKDG na univerzitě RWTH Aachen	50
6.1.9	Toshiba Corporation Japonsko.....	50
6.1.10	Oak Ridge National Laboratory	51
6.2	Měření použitím sond.....	52
6.2.1	Podmínky pro měření	52
6.2.2	Pracoviště používající experimentální metody	53
7	Závěr.....	56
	Seznam použitých zdrojů	57

Přehled použitých zkratk a symbolů

Zkratky:

NT	Nízkotlaký
PT	Parní turbína
R-C	Rankin-Clausiiův
CFD	Computational Fluid Dynamics
SVÚSS	Státní výzkumný ústav pro stavbu strojů
ČVUT	České vysoké učení technické
RL	Rozváděcí lopatka
LED	Light-Emitting Diode
IPI	Interferometric Particle Imaging
PDPA	Phase Doppler Particle Analysis
LDA	Laser Doppler Anemometry
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
EDF	Électricité de France
USST	University of Shanghai for Science and Technology
CKTI	Центральный котлотурбинный институт
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
IKDG	Das Institut für Kraftwerkstechnik, Dampf – und Gasturbinen
ITSM	Institut für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium

Symboly:

x	[-]	Suchost
y	[-]	Vlhkost
m'	[kg]	Hmotnost syté kapaliny
m''	[kg]	Hmotnost syté páry
T_H	[K]	Teplota při přívodu tepla do Carnotova cyklu
T_C	[K]	Teplota při odvodu tepla z Carnotova cyklu
T_{ekH}	[K]	Ekvivalentní teplota při přívodu tepla do RC cyklu
T_{ekC}	[K]	Ekvivalentní teplota při odvodu tepla z RC cyklu
η_{carnot}	[-]	Účinnost Carnotova cyklu
η_{wet}	[-]	Účinnost pro mokrou páru
η_{dry}	[-]	Účinnost pro suchou páru
y_{mean}	[-]	Průměrná hodnota vlhkosti
α_B	[-]	Baumanův faktor

D	[μm]	Průměr částice kapalné fáze
D_1	[μm]	Střední hodnota průměrů primárních kapek
Δq	[J/kg]	Ztráta entalpie
θ	[$^\circ$]	Pozorovací úhel
α	[-]	Parametr velikosti částice (poměr průměru a vlnové délky)
$J_1(X)$	[-]	Besselova funkce prvního řádu závislá na parametru X
$Ai(X)$	[-]	Airyho funkce závislá na parametru X
I_0	[cd]	Intenzita ozařujícího záření
I	[cd]	Intenzita záření po interakci s částicí
I_1	[cd]	Intenzita záření při útlumu primárními kapkami
I_{sca}	[cd]	Zeslabení intenzity vlivem rozptylu
I_{abs}	[cd]	Zeslabení intenzity vlivem absorpce
$I(\theta)$	[cd]	Vzor intenzity závislý na pozorovacím úhlu
λ	[nm]	Vlnová délka
J_1	[-]	Besselova funkce prvního řádu
X	[-]	Bezrozměrný parametr Airyho funkce
f	[m]	Ohnisková vzdálenost
l	[m]	Vzdálenost od středu difrakčního obrazce
m	[-]	Relativní index lomu světla
Φ	[-]	Rozložení velikosti kapek
τ	[1/m]	Kalnost (anglicky „Turbidity“)
Q_{ext}	[1/m]	Extinkční koeficient
L	[m]	Délka pozorovaného objemu
n	[-]	Počet použitých vlnových délek
ρ'	[kg/m ³]	Hustota syté kapaliny
ρ''	[kg/m ³]	Hustota syté páry
F_1	[J]	Světelná energie při útlumu primárními kapkami
F_2	[J]	Světelná energie při útlumu sekundární kapkou
ΔF	[J]	Změna světelné energie
D_{32}	[μm]	Sauterův střední průměr
n_i	[-]	Počet částic s průměrem D_i

Seznam obrázků

Obrázek 1: Aeolipile [5].....	14
Obrázek 2: Wilsonova linie znázorněná v h-s diagramu [6].....	15
Obrázek 3: Carnotův cyklus v T-s diagramu [11].....	15
Obrázek 4: Zvyšování účinnosti R-C základního cyklu (nalevo) pomocí zvýšení teploty (uprostřed) nebo přehříváním (napravo).....	16
Obrázek: 5 Výsledky z měření ztrát po délce lopatky [1].....	17
Obrázek 6: Normovaný graf termodynamických ztrát v závislosti na vlhkosti [15]	18
Obrázek 7: Popis průchodu a odtrhávání sekundárních kapek [16].....	19
Obrázek 8: Schéma metody „Photography“ s rozdílným osvětlením [10]	21
Obrázek 9: Zadní ozáření kontinuálním LED zdrojem [10]	22
Obrázek 10: Přední ozáření kontinuálním LED zdrojem [10]	22
Obrázek 11: Schéma (nalevo) a výsledný obraz (napravo) ozáření side illumination [21]	23
Obrázek 12: Výsledný snímek metody pulzního ozáření v uspořádání side illumination [21].....	24
Obrázek 13: Princip metody holography, vytváření hologramu [24]	24
Obrázek 14: Znázornění rozptylu světla v závislosti na velikosti částice [26]	26
Obrázek 15: Schéma optického systému pro měření metodou difrakce [24]	27
Obrázek 16: Názorné schéma principu fungování metody IPI (ILIDS) a GPVS [31].....	28
Obrázek 17: Schéma fungování metody PDPA [33]	29
Obrázek 18: Fázový posun dvou signálů PDPA [19]	29
Obrázek 19: Intenzita záření s v závislosti na úhlu pozorování θ a parametru α [19]	29
Obrázek 20: Graf intenzity rozptýleného světla v závislosti na poloměru [37].....	30
Obrázek 21: Schéma sondy na principu forward scattering [39]	32
Obrázek 22: Graf útlumu intenzity pro zpětné pozorovací úhly v závislosti na velikosti kapky [38]	32
Obrázek 23: Pole použití extinkčních sond v závislosti na vlhkosti a velikosti částic [42].....	34
Obrázek 24: Schéma extinkční metody pro uspořádání 1 [3]	34
Obrázek 25: Schéma extinkční metody pro uspořádání 2 [41]	35
Obrázek 26: Pulz světelné energie v závislosti na čase [43].....	35
Obrázek 27: Schéma optického systému pro metodu light fluctuation [43].....	36
Obrázek 28: Graf popisující oblasti výskytu a použitelné metody v závislosti na poloměru částice	37
Obrázek 29: Kombinovaná extinkční pneumatická sonda (a) schéma; (b) fotografie [52]	40
Obrázek 30: Videosonda vyvinuta USST Šanghaj (a) schéma; (b) fotografie [51].....	41
Obrázek 31: Sonda FRAB-OB na principu light scattering [53]	41

Obrázek 32: (a) Vyhřívaná extinkční sonda (b) Model vyhřívané extinkční sondy [41]	42
Obrázek 33: ITSM - Kombinovaná pneumatická extinkční sonda první generace [50]	43
Obrázek 34: ITSM - Kombinovaná pneumatická extinkční sonda druhé generace [50]	43
Obrázek 35: ITSM - Kombinovaná pneumatická extinkční sonda třetí generace [50]	44
Obrázek 36: Schéma kombinované sondy CKTI [19]	45
Obrázek 37: CKTI Sonda pro měření primárních a sekundárních kapek [49]	45
Obrázek 38: CVUT - Extinkční sonda M1 (nahore) a M2 (dole) [57]	46
Obrázek 39: Schéma fotografické sondy s kontinuálním osvětlením [10]	47
Obrázek 40: Fotografie fotogrammetrické sondy [57]	47
Obrázek 41: Micro-video sonda s použitím pulzního laseru vyvinuta EDF [19]	48
Obrázek 42: Holografická sonda [19]	48
Obrázek 43: Systém extinkčního měření (CORIA, EDF, Cai) [59]	49
Obrázek 44: Fotografická sonda s pulzním LED ozářením [60]	49
Obrázek 45: Sonda na principu side-scattering (IKDG z RWTH Aachen) [19]	50
Obrázek 46: Sonda firmy Toshiba fungující na principu forward scattering [39]	51
Obrázek 47: Schéma sondy na principu phase doppler technique [35]	51
Obrázek 48: Interferenční obrazec (nalevo) a signál (napravo) time shift PDPA sondy [35]	52
Obrázek 49: Příklad poloh pro měření na NT dílu PT [57]	53
Obrázek 51: Schéma testovacího zařízení firmy EDF [59]	54
Obrázek 52: Řez experimentální turbínou ITSM Stutgard [50]	54
Obrázek 53: Sondování na experimentální turbíně CKTI [49]	55

1 Úvod

S nárůstem požadavků naší společnosti roste i spotřeba elektrické energie, která je nezbytná ve všech odvětvích průmyslu. Parní turbíny jsou již mnoho let nedílnou součástí většiny systémů na výrobu elektrické energie. I malá odchylka v účinnosti elektrické elektrárny, respektive parní turbíny, může znamenat dramatický rozdíl ve vygenerovaném výkonu a tím pádem zajistit i větší finanční zisk, nebo způsobit ztrátu. Proto se výzkum mnoha pracovišť po celém světě zaměřuje na zvyšování účinnosti jednotlivých částí elektrárny. Vlhkost páry je jeden z faktorů, které je nutné monitorovat, protože přímo snižuje termodynamickou účinnost parní turbíny a má vliv na erozi lopatek, tím pádem i na jejich životnost. Vlhkost páry y , popsána rovnicí (1), je definována jako podíl hmotnosti kapalné fáze ku celkové hmotnosti mokré páry. V termodynamice se také pracuje s pojmem suchost, vzorec pro její výpočet je uveden v rovnici (2).

$$y = \frac{m'}{m' + m''} = 1 - x \quad (1)$$

$$x = \frac{m''}{m' + m''} = 1 - y \quad (2)$$

Vlhkost spojená s kondenzující parou je způsobena nižší teplotou a tlakem expandující páry a je typická pro nízkotlaký stupeň parní turbíny. U turbín jaderných elektráren s admisní parou s nízkými parametry probíhá expanze pouze v oblasti mokré páry a tím pádem jsou problémy spojené s vlhkostí přítomné na všech stupních expanze. Kapalná fáze je přítomná v parní turbíně jako **kapky** o různé velikosti anebo **vodní filmy**. Znalost množství vodních kapek a rozdělení na základě rozměru je prvním krokem k minimalizaci aerodynamických ztrát a redukci opotřebení lopatek erozí. Vodní kapky se zpravidla dělí na **primární kapky** ($d < 1 \mu\text{m}$), které tvoří až 95 % váhového podílu mokré páry, a na **kapky sekundární** ($1 < d < \text{cca } 400 \mu\text{m}$). Vodní filmy nejsou předmětem této práce, ale porozumění tomu, jak vznikají, a tomu, jak se v parní turbíně chovají, může vést k úpravám vedoucím k redukci sekundárních kapek (viz kapitola 4.5.2). [1, 2]

Proudové pole uvnitř turbíny je velmi komplexní, je ovlivněno geometrií turbíny, příměsí obsaženými v páře a jejími parametry. Modelování těchto jevů je náročné a bez experimentálního ověření prakticky nelze považovat za přesné. Hlavní motivací experimentálního ověření v parních turbínách je tedy bližší porozumění chování kapalné fáze a dvoufázového proudění páry uvnitř PT. Příklady použití dat z měření jsou:

1. Validace modelů používaných v CFD ověřovacích výpočtech s dvoufázovým prouděním.
2. Ochrana proti erozi
 - a. návrhem optimalizovaných aktivních erozních ochran,
 - b. návrhem materiálů lopatek, které dosáhnou požadované životnosti, díky zjištěné velikosti a rychlosti kapek, které způsobují erozi,
 - c. numerickým modelováním a předpovídáním eroze.
3. Předpovídání ztrát způsobených mokrou parou.

Další motivací pro měření na konkrétní turbíně může být nalezení koncových bodů expanze a určení účinnosti NT dílu zkoumané turbíny. [3]

Tato práce se věnuje optickým metodám, které umožňují měření vlhkosti páry pomocí optických sond. Optické metody jsou chápány, jako postupy, které využívají fyzikálních principů (například rozptyl světla, zákony geometrické optiky), za účelem zjištění vlastností kapalné fáze uvnitř parní turbíny. Cílem práce je metody popsat a porovnat. Porovnání probíhá

na základě vhodnosti pro implementaci do sond pro měření uvnitř PT a je rozdělené na metody pro měření primárních a sekundárních kapek. Dalším cílem je popsat pracoviště, které se věnují vývoji optických sond a pracoviště, které sondy používají pro experimentální výzkum uvnitř PT.

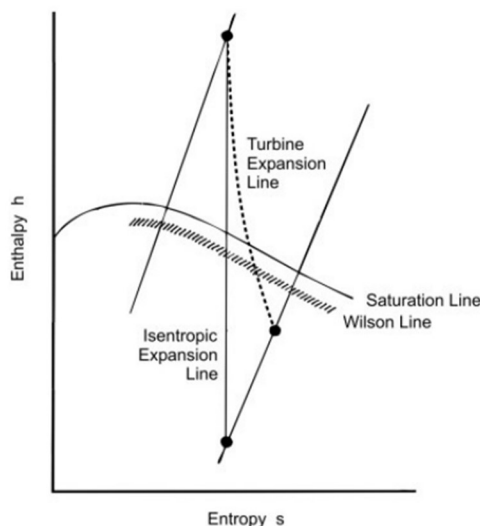
2 Historie

Stroje podobné parní turbíně se objevily v lidské historii už v prvním století v Alexandrii, kdy Héron Alexandrijský vynalezl takzvanou aeolipili, která využívala vodní páru k roztočení disku (viz obrázek 1). Moderní rovnotlakou parní turbínu vynalezl v roce 1882 Gustav de Laval. Dva roky poté vynalezl přetlakovou parní turbínu Charles Parsons. Jeho patent byl zakoupen Georgem Westinghousem a vývojem bylo dosaženo většího výkonu. Tato turbína a turbíny jí podobné se rychle rozšířily a jejich vývoj neustal až dodnes. [4]



Obrázek 1: Aeolipile [5]

Etapu zkoumání vlhkosti páry započal Aurel Stodola, profesor spolkové vysoké technické školy v Curychu. Stodola experimentálně zkoumal kondenzaci na dýzách. Dalším důležitým průlomem bylo objevení a popsání Wilsonovy linie (viz obrázek 2), tedy oblasti, která určuje v Mollierovo diagramu (diagram popisující chování entalpie v závislosti na entropii) rozhraní, na kterém začíná pára skutečně kondenzovat. Za dalšího průkopníka lze považovat vědce jménem Georg Gyarmathy, který v roce 1962 popsal základy chování mokré páry v turbíně [6]. V roce 1976 byla vydána sbírka publikací a poznámek z přednášek o dvoufázovém proudění v turbínách z konference na von Karmanově institutu dynamiky tekutin. Tato sbírka přehledně popsala dosavadní znalosti o kapalně fázi v parních turbínách, a to hlavně od zmiňovaného George Gyarmathyho a Farhanga Bakhtara. Zvláštní vydání souhrnu IMechE („Institution of Mechanical Engineers“) 2005/2006 o mokré páře sjednotilo články, jejichž cílem bylo pokrýt výzkum na téma mokré páry v parní turbíně za uplynulá desetiletí. Z řady prezentovaných článků a odkazů v nich je zřejmé, že zatímco v oblasti numerického modelování nukleace a vodní páry došlo k významnému pokroku, stav experimentálních ověřování v oblasti výzkumu a vývoje se posunul jen nepatrně. V roce 2012 se konala konference ke stému výročí vyjádření Baumannova pravidla (viz kapitola 4.3) na které vědci představili nejnovější poznatky z výzkumu mokré páry v parní turbíně. I když se mnoho příspěvků zabývalo modely nukleace a CFD, vzrostl zájem o experimentální ověřování dat, a to díky příspěvkům zabývajícím se extinkcí bílého světla, metodou „particle image velocimetry“ (PIV) a metodou „phase doppler particle analysis“ (PDPA). [1, 7]



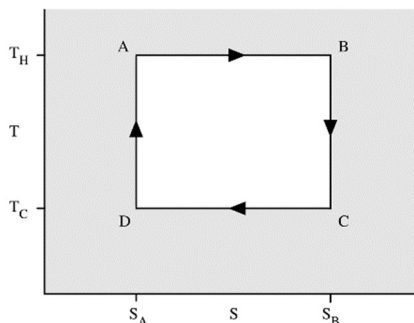
Obrázek 2: Wilsonova linie znázorněná v h-s diagramu [8]

V České republice může výzkum problematiky kapalně páry v parních turbínách konkurovat pracovištím z jiných zemích. Prvním zmíněným je Ing. Jan Valha, DrSc. (SVÚSS Praha), který se věnoval aplikovanému teoretickému a experimentálnímu výzkumu dvoufázového proudění mokré vodní páry v parních turbínách. Tým z SVÚSS pod jeho vedením nezastupitelně přispěl k vývoji turbíny 1000 MW pro jadernou elektrárnu Temelín. Další rozsáhlejší studie na toto téma sepsal Václav Petr z ČVUT a Ladislav Tajč z Škoda Power. V dnešní době se experimentálnímu výzkumu věnuje hlavně Michal Kolovratník a Ondřej Bartoš z Ústavu energetiky fakulty strojní ČVUT. [3, 9, 10]

3 Carnotizace R-C cyklu

Existuje mnoho způsobů, jak zvyšovat účinnost turbíny. Jedním z těchto způsobů je carnotizace, tedy přiblížení se Carnotovu cyklu (viz obrázek 3). Carnotův cyklus je teoretický termodynamický cyklus jehož tepelná účinnost je dána pouze poměrem teploty přívodu tepla ku teplotě odvodu tepla. Tento cyklus je ideální, jeho účinnost je popsána rovnicí (3) a je rovna maximální termodynamické účinnosti, které lze v jiném cyklu dosáhnout při stejných teplotách T_H a T_C .

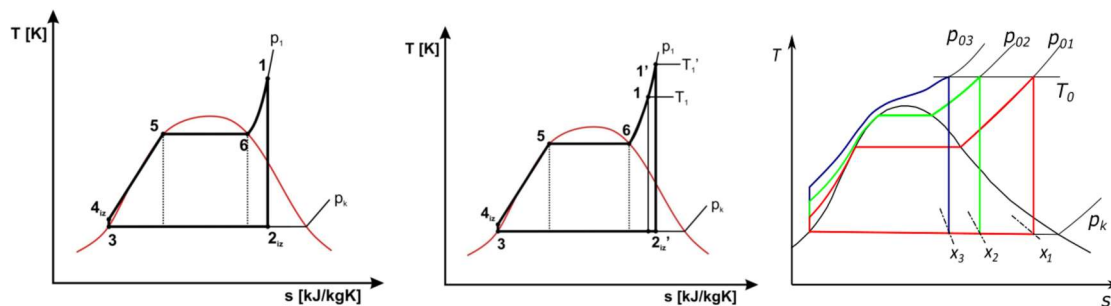
$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_H}{T_C} \tag{3}$$



Obrázek 3: Carnotův cyklus v T-s diagramu [11]

Při carnotizaci Rankin-Clausiova cyklu (cyklu parní turbíny, viz obrázek 4 - nalevo) je cílem zvýšit ekvivalentní teplotu přívodu tepla T_{ekH} anebo snížit ekvivalentní teplotu odvodu

tepla T_{ekC} . Při zvyšování teploty admisní páry je dosaženo vyšší T_{ekH} a tím pádem vyšší termodynamické účinnosti (viz obrázek 4 – uprostřed). Limitem v oblasti teplot jsou materiály pro výrobu lopatek. Pro tepelně odolné materiály nastává často problém obtížné zpracovatelnosti a svařitelnosti a téměř vždycky se s vyšší tepelnou odolností pojí vyšší cena materiálu. Druhým způsobem zvyšování T_{ekH} je zvyšování tlaku admisní páry. Z diagramu R-C cyklu je vidět, že zvyšováním tlaku je dosaženo vyšší teploty ve dvoufázové oblasti. Pokud se však pracuje se stejnou teplotou admisní páry, tak pro vyšší tlaky roste i míra vlhkosti. Posledním způsobem zvýšení ekvivalentní teploty přívodu tepla je přehřívání (viz obrázek 4 – napravo). Při přehřívání se expanze přeruší a páře je znovu přivedeno teplo. Přehřátá pára je znovu vedena do turbíny tentokrát však s nižším tlakem. Tímto procesem se snižuje vlhkost páry na posledních stupních. Proces přehřívání lze opakovat, a tak zvyšovat termodynamickou účinnost a snižovat vlhkost páry. Optimální hodnoty vlhkosti při návrhu Rankin-Clausiova s NT dílem se doporučují 8–10 %. V cyklech jaderných elektráren s tlakovodním reaktorem tato hodnota může být na NT dílu 9-13 % a na VT dílu 5-7 %. V NT dílech turbín spaloven odpadu tato hodnota může dosáhnout až 20 %. Hodnota vlhkosti je ovlivněna umístěním přehříváku, teplotami na vstupu a na výstupu turbíny, to znamená, že její hodnota je individuální pro každou turbínu [1, 12]



Obrázek 4: Zvyšování účinnosti R-C základního cyklu (nalevo) pomocí zvýšení teploty (uprostřed) nebo přehříváním (napravo)

4 Kapalná fáze v PT

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1, kapalná fáze je v turbíně přítomna jako vodní filmy a kapky. Formálně jsou kapky děleny na primární (někdy označované jako jemné, anglicky „fine“) a sekundární (někdy označované jako hrubé, anglicky „coarse“). Hlavní parametr, kterým je lze rozlišit je jejich průměr D . To, jak velký průměr je, závisí na podmínkách vzniku a vývoje kapalně fáze. Toto rozdělení je důležité, protože v kapitole 5 se metody měření kapek kapalně fáze často vztahují pouze k primárním nebo pouze k sekundárním kápkám.

4.1 Vznik primárních kapek

Primární kapky vznikají obvykle jako první v mokré páře po překročení Wilsonovy linie (viz obrázek 2 v kapitole 2). Molekuly vody se hromadí, často obalují cizí částice jako jsou soli, a následně kondenzují. Takto vzniklé částice v proudu převažují a tvoří až 95 % hmotnostního podílu kapalně fáze v proudu mokré páry. Jejich velikosti se pohybují v rozmezí do 1 [1]

4.2 Vznik sekundárních kapek

Sekundární kapky jsou následkem ulpívání primárních kapek na obtékaných površích, jako jsou rozváděcí lopatky (dále jen RL) a stator. Na těchto površích RL se tvoří tenké vodní

filmy, které se vlivem proudící páry od odtokových hran rozváděcích lopatek odtrhávají a jsou unášeny proudem páry. Jejich velikosti se pohybují v rozmezí od 1 do 500 μm . [1]

4.3 Ztráty vlivem kapalně fáze

První propojení ztrát v turbíně a vlhkosti proudící páry navrhl už v roce 1910 K. Baumann [13]. Původní Baumanovo pravidlo zní, že s každým nárůstem průměrné vlhkosti (y_{mean}) o 1% se isoentropická účinnost mokré páry (η_{wet}) sníží o 1% z hodnoty pro suchou páru (η_{dry}). Baumanovo pravidlo lze popsát rovnicí (4).

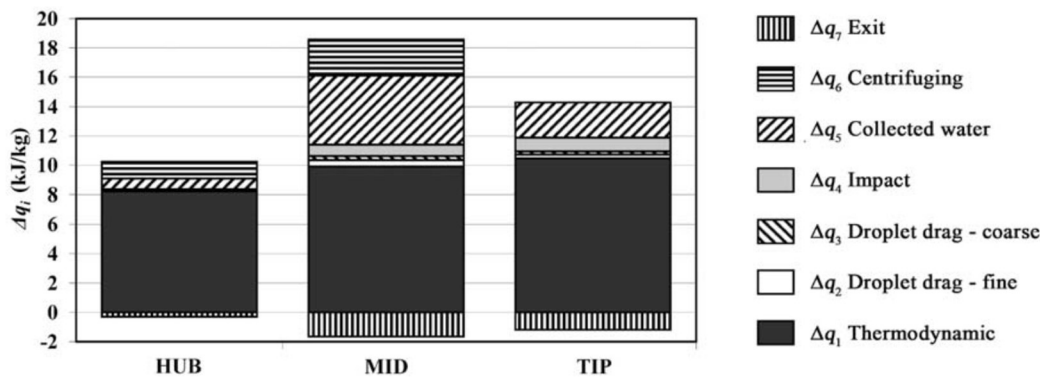
$$\eta_{wet} = \eta_{dry} \cdot (1 - \alpha_B \cdot y_{mean}) \quad (4)$$

V tomto vzorci též figuruje Baumanův faktor α_B , pro který by podle původního pravidla mělo platit $\alpha_B = 1$, experimentálně se však ukázalo, že tato konstanta neodpovídá skutečnosti a Baumanův faktor vycházel z různých experimentů v rozmezí (0,4 – 2,5). Baumanův faktor je různý pro různé turbíny a je proměnlivý i napříč průtočnou částí. [1]

K pochopení problematiky ztrát vlivem přítomnosti kapalně fáze přispěli Václav Petr a Michal Kolovratník z Ústavu energetiky Fakulty strojení ČVUT. Na základě jejich výzkumu lze rozdělit zdroje ztrát následovně:

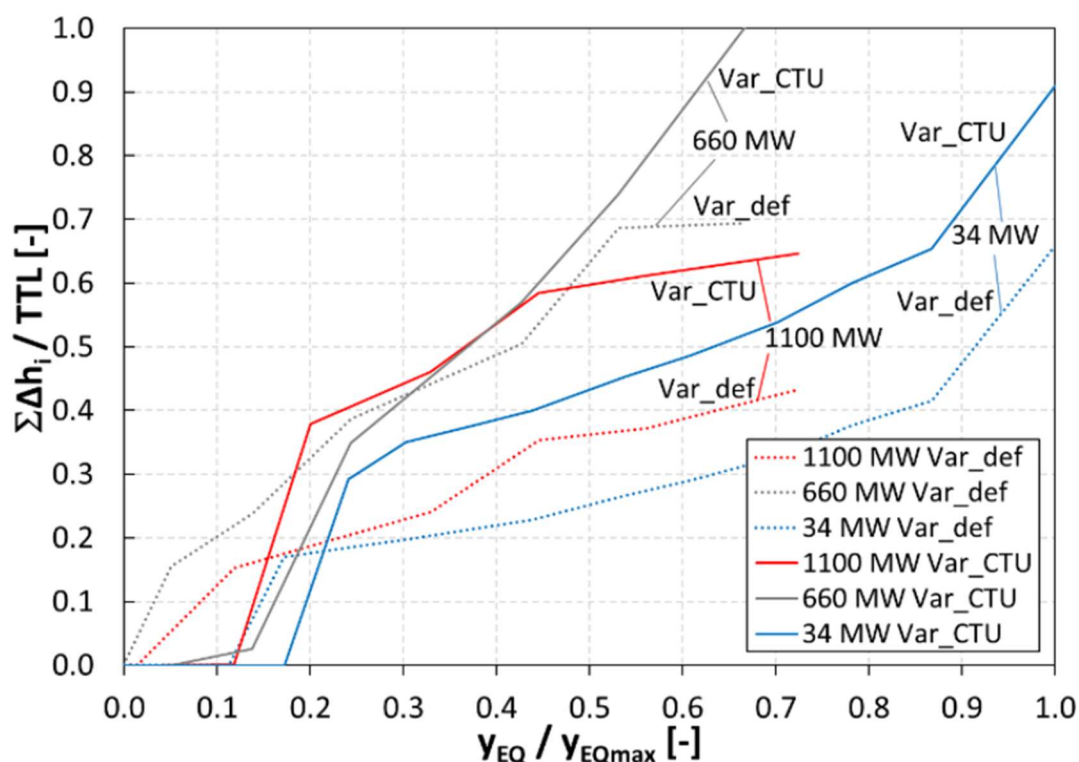
- Δq_1 – **Termodynamická ztráta** (vlivem přenosu hmoty a tepla mezi kapalnou a parní fází včetně procesu nukleace v oblasti za Wilsonovou linií)
- Δq_2 – **Ztráta aerodynamickým odporem primárních kapek** (práce třecí síly způsobená relativní rychlostí mezi primárními kapkami a proudící párou)
- Δq_3 – **Ztráta aerodynamickým odporem sekundárních kapek** (práce třecí síly způsobená relativní rychlostí mezi sekundárními kapkami a proudící párou)
- Δq_4 – **Nárazová ztráta** (způsobená předáním energie nárazy kapek do oběžných lopatek)
- Δq_5 – **Ztráta ulpíváním na obtékaných površích** (nevyužitá práce zkondenzované páry odvedené v průběhu expanze)
- Δq_6 – **Odstředivá ztráta** (energie potřebná pro uvedení do pohybu zachycené vody na lopatkách rotoru)
- Δq_7 – **Výstupní ztráta** (ve skutečnosti je to zisk způsobený kapkami, které byli započítány v ostatních ztrátách i když na ně neměli vliv)

Tyto zdroje ztrát byly experimentálně vyhodnocovány na základě měření na posledním stupni turbíny jaderné elektrárny o výkonu 1000 MW. Na obrázku 5 jsou znázorněny jednotlivé ztráty vlhkostí na plochách u paty (HUB), středu (MID) a špičky (TIP) oběžné lopatky. [3, 14]



Obrázek: 5 Výsledky z měření ztrát po délce lopatky [15]

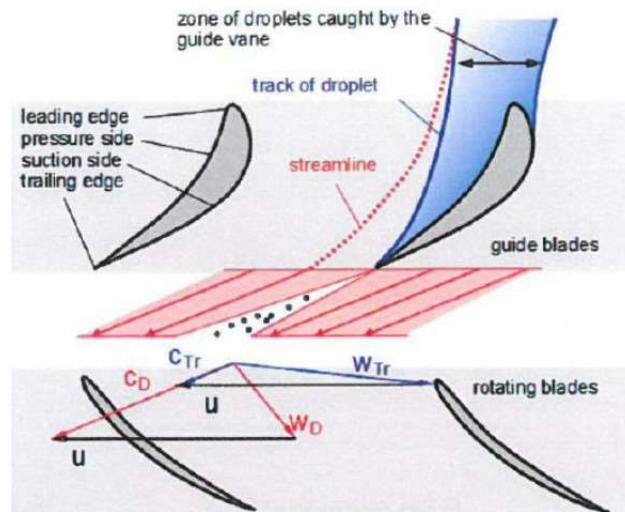
Z grafu na obrázku 6 lze pozorovat výsledky měření kapalně fáze na turbínách 34 MW, 600 MW a 1000 MW zakreslené do grafu. Graf popisuje ztráty způsobené hlavně nukleací a růstem kapek kapalně fáze v závislosti vlhkosti v turbíně. Veličiny jsou normované vydělené maximální hodnotou a škály na osách se proto pohybují od 0 do 1. Na těchto výsledcích lze pozorovat, že nukleace má na termodynamické ztráty obecně intenzivnější vliv než růst kapek. Tento graf také potvrzuje nenahraditelnost experimentálního výzkumu, protože chování ztrát v závislosti na vlhkosti se v každé turbíně dramaticky liší a nelze ji tak modelovat jednoduchou rovnicí. [16]



Obrázek 6: Normovaný graf termodynamických ztrát v závislosti na vlhkosti [16]

4.4 Eroze vlivem kapalně fáze

Eroze nastává vlivem dopadu kapek na náběžnou stranu oběžné lopatky. Největší poškození lze pozorovat na náběžných hranách blízko špičky lopatky. V těchto místech totiž probíhají nárazy s největší dopadovou rychlostí. Sekundární kapky jsou unášeny a urychlovány proudem páry a narážejí do oběžných lopatek a narušují jejich povrch. Primární kapky mají na erozi oproti kapkám sekundárním zanedbatelný vliv. Největší vliv mají faktory jako **dopadová rychlost kapek, úhel dopadu kapek, velikost kapek a vlhkost páry**. Erozní působení je možno popsat pomocí rychlostních trojúhelníků, kde vektor relativní rychlosti páry je jiný než vektor relativního pohybu sekundárních kapek (viz obrázek 7). Dopady kapek způsobují krátkodobé zvýšení tlaků převyšující meze únavy materiálu, to vede k šíření a propojování trhlin v materiálu a následnému úbytku materiálu. Takovéto úbytky snižují životnost lopatek. [17, 18]



Obrázek 7: Popis průchodu a odtrhávání sekundárních kapek [17]

4.5 Ochrany proti erozi

Ochrany proti erozi se dělí na aktivní a pasivní. Je mnoho možností ochrany, a navíc lze různé kombinovat, proto jsou pro každý projekt voleny ochrany individuálně. K volbě aktivních i pasivních protierozních ochrany je důležité znát následující informace:

- Způsob provozu
- Časové rozvržení jednotlivých provozů
- Požadované záruky
- Požadovaná životnost lopatek

V následujících dvou kapitolách jsou shrnuty nejpoužívanější pasivní a aktivní ochrany. [17]

4.5.1 Pasivní ochrany

Jejich cílem je zmírnit erozní poškození vytvořením co nejlepší erozní ochrany. Tyto ochrany se aplikují při výrobě lopatky a v průběhu provozu už neplní žádný aktivní účinek. Obecně se erozní ochrana popisuje podle tří hledisek: dostatečná tvrdost, vysoká únavová pevnost a tloušťka vrstvy. Jednotlivé ochrany lze kombinovat mezi sebou pro lepší účinek. V praxi jsou používány následující pasivní ochrany:

- Kalení náběžné hrany lopatky (omezuje výběr materiálu podmínkou kalitelnosti)
- PVD (z anglického „physical vapor deposition“) tenké vrstvy (zajišťuje vysokou erozní ochranu, ale nevýhodou je vysoká cena)
- HVOF, tedy proces tepelného nástřiku (výhodou je možnost nanášet dostatečnou tloušťku povlaku až 1 mm s vysokou tvrdostí)
- Stelitový návar na náběžné hraně (prášek slitiny kobaltu roztaven laserem, nejpoužívanější)

Při vybírání pasivní ochrany je nutné brát v potaz ekonomickou stránku výroby, a hlavně provozní podmínky, kterým budou lopatky vystaveny. I proto je důležité znát detailní informace o vlhkosti páry a kapkách vody v parní turbíně. [18, 19]

4.5.2 Aktivní ochrana

Aktivní ochrany se obecně soustřeďují na snížení přítomnosti sekundárních kapek. Mohou mít i příznivý vliv na chování páry. V praxi používány jsou následující aktivní ochrany:

- Odvodňovací kanály a separátory odvádějící vlhkost
- Změna axiální vzdálenosti mezi rozváděcí a oběžnou lopatkou (více času na urychlení má za následek menší dopadovou rychlost, stejného efektu lze dosáhnout i odlišným nakloněním RL)
- Duté odsávané rozváděcí lopatky (vodní film je odsáván otvory na přetlakové a někdy i podtlakové straně RL)
- Hydrofobní povlak rozváděcí lopatky (vysoký kontaktní úhel zabraňuje hromadění primárních kapek a tvorbě vodních filmů a omezuje tak vznik sekundárních kapek)
- Vyhřívané rozváděcí lopatky (povrch RL s vysokou teplotou zajistí odpařování části vodního filmu a omezuje vznik sekundárních kapek)

Aktivní ochrany lze kombinovat a snížit tak množství sekundárních kapek a tím pádem omezit vliv eroze. [19]

5 Optické metody měření vlhkosti

Při jakémkoliv měření v parní turbíně by mělo docházet k minimálnímu ovlivňování proudu turbíny. Dalším kritériem je návrh sond s ohledem na omezené rozměry vymezené pro měření na parní turbíně. Posledním kritériem je přesnost výsledků a s tím spojená proveditelná kalibrace. Pro měření kapalně fáze je nutné se soustředit na tři hlavní otázky:

1. Jaký je hmotnostní podíl kapalně fáze, tedy jaká je vlhkost páry?
2. Jak velké jsou částice kapalně fáze a jaké je jejich rozložení?
3. Jaká je rychlost a směr pohybu částic kapalně fáze?

Na základě těchto otázek je v kapitole 5.3 provedeno porovnání jednotlivých metod používaných pro měření v parních turbínách. [7, 20]

Optické metody lze rozdělit na metody zachycení obrazu (fungují na principu pozorování kapek pomocí kamery a následné analýzy) a metody fungující na principu pozorování záření vzniklého ozářením částice neboli metody ozáření částice. Z důvodu neúplnosti české literatury popisující tyto metody bylo použito pojmenování v anglickém jazyce, které je zaběhlé a tím pádem jednoznačné. [21]

5.1 Metody zachycení obrazu

Metody zachycení obrazu vznikly na základě jednoduché a přímočaré metody, kterou je prostá fotografie. Fotografování je však omezené malou hloubkou ostrosti, rychlostí pozorovaných částic a také typem osvětlení. Pro měření v parních turbínách je proto prosté fotografování částic nepoužitelné. Pro měření velkých kapek (sekundárních) byly vyvinuty metody, které používají zachycení obrazu kamerou a které řeší výše zmíněné omezení. Mezi tyto metody patří fotografické metody (označené „Photography“) a metoda „holografy“, kterou je však nutné zkombinovat s metodou, která zachycený obraz (hologram) zrekonstruuje. [21]

5.1.1 Photography

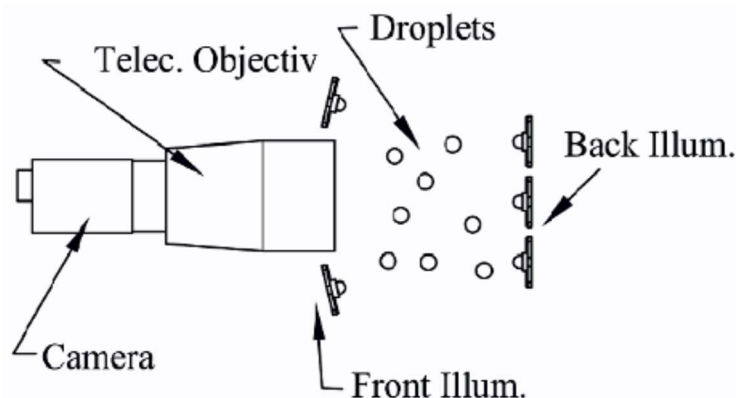
Metody spadající do této kategorie jsou nejpoužívanějšími metodami pro měření velikostí a rychlostí sekundárních kapek v parních turbínách. Všechny pracují na principu analýzy snímků zachycených kamerou. Pouhé zachycení obrazu kamerou bez osvětlení není možné kvůli nedostatku světla v turbíně, proto je nutné zvolit správné ozáření částic. Původní sondy využívaly ozáření laserem. Laser však pro tuto metodu není vhodným zdrojem světla, protože laserové záření je koherentní, a to vede ke vzniku interferenčních obrazců. Na výsledném

obrazu pak vznikají světelné skvrny, což ztěžuje analýzu obrazu. Proto nejnovější sondy používají jako zdroj záření LED. Ozáření pomocí LED

- 1) je nekoherentní na rozdíl od laseru, tím pádem nezpůsobuje světelné skvrny,
- 2) nemá tak široký rozsah vlnových délek na rozdíl od bílého záření, tím pádem je nezpůsobuje chromatická vady, které vytvářejí na fotografiích podél okrajů částic nežádoucí barevný obrys,
- 3) je výrazně levnější v porovnání s ozářením pomocí laseru.

Hlavní omezení metody „Photography“ vzniká v důsledku vysoké rychlosti proudících kapek. Kamery v systémech využívajících kontinuální osvětlení potřebují mít krátkou dobu expozice, která dokáže zachytit letící kapku v pozorovaném objemu. Alternativní metodou je pulzní osvětlení. Další kapitoly se věnují do detailů rozdílů mezi kontinuálním („continuous illumination“) a pulzním („pulsed illumination“) osvětlením a rozdílů mezi předním („front illumination“), zadním („back illumination“) a bočním („side illumination“) osvětlením. Schéma na obrázku 8 ukazuje možná uspořádání. [7, 10, 22]

Dělení těchto metod spočívá v geometrickém uspořádání sondy. Uspořádání je dané polohou zdroje světla v závislosti na poloze kamery a pozorovaného objemu (jednotlivá uspořádání jsou popsány v kapitolách 5.1.1.1, 5.1.1.2 a 5.1.1.3). Metody se také dělí podle typu osvětlení na kontinuální a pulzní (jednotlivé typy osvětlení jsou popsány v kapitolách 5.1.1.4 a 5.1.1.5).



Obrázek 8: Schéma metody „Photography“ s rozdílným osvětlením [10]

Důležitým prvkem při návrhu sondy je zajištění čistoty optického systému. Nejčastěji se používá stlačený vzduch vedený sondou. Vzduch proudí na povrchy optického systému a zabraňuje ulpívání kapek kapalné fáze na skle. Další ochranou proti ulpívání kapek může být aplikování hydrofobního, transparentního povlaku na povrchy optického systému. [7]

Pro měření rychlostí se vždy využívá analýza dráhy částice a znalost časového intervalu, za který byla dráha vytvořena. Časový interval je definovaný dobou expozice kamery nebo rozestupem záblesku při pulzním osvětlení. [7, 20]

Ukazuje se, že zkonstruování sondy, která by obstála v nepříznivých podmínkách uvnitř parní turbíny a zároveň vykazovala přesné výsledky, je velmi náročné. Více informací o konkrétních sondách je obsaženo v kapitole 6.1. [7, 20]

5.1.1.1 Back illumination (Shadowgraphy)

Tato metoda je definovaná polohou pozorovacího objemu mezi kamerou a zdrojem záření. Kamera tak snímá stín objektu místo toho, aby snímala samotný objekt. Proto se sondy

používající zadní osvětlení označují termínem „shadowgraph“. Do českého jazyka se „shadowgraph“ někdy překládá jako stínograf.

Metoda „shadowgraphy“ je nejrozšířenější metodou pro pozorování sekundárních kapek kapalné fáze v laboratorních podmínkách. Na tomto principu fungují komerční optické zařízení pro pozorování kapek v laboratorních podmínkách (například od firmy Dantec Dynamics [23], nebo Oxford Lasers [24]). Pro pozorování kapalné fáze v parní turbíně však nelze tyto zařízení použít, proto je nutný vývoj speciálních sond, které lze umístit do proudu páry uvnitř turbíny.

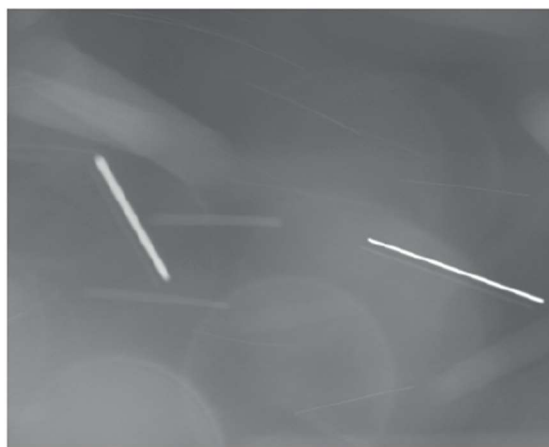
Při použití zadního osvětlení je možné ozářit systém při zachování relativně malé geometrie hlavice sondy. Problémem zadního osvětlení je horší kvalita osvětlení (viz obrázek 9) a riziko vzniku falešných sekundárních kapek, které se odtrhávají z povrchu sondy a mohou ovlivnit měření. [10]



Obrázek 9: Zadní osvětlení kontinuálním LED zdrojem [10]

5.1.1.2 *Front illumination*

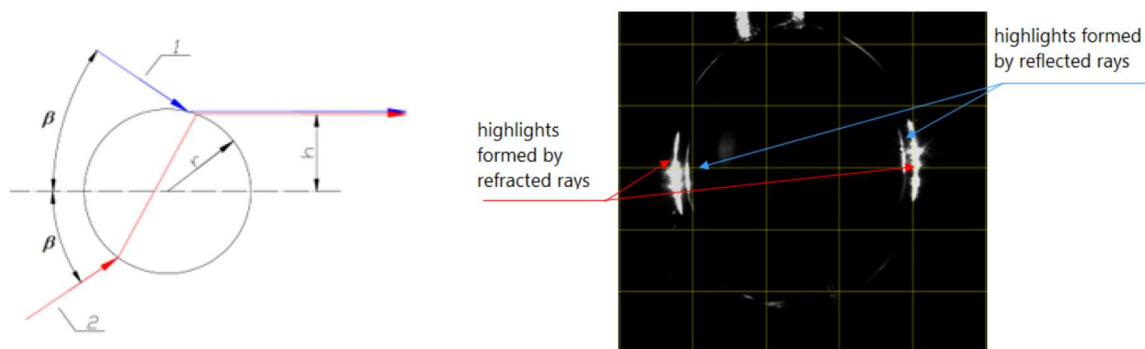
Výhodou předního osvětlení je lépe viditelná dráha kapek (viz obrázek 10). Nevýhodou jsou nároky na geometrii sondy, která je omezená hlavně vnějším průměrem (průměrem otvorů pro sondování v turbínách). [10]



Obrázek 10: Přední osvětlení kontinuálním LED zdrojem [10]

5.1.1.3 Side illumination

Toto uspořádání využívá zákonu geometrické optiky při ozáření částice pod úhlem odklonění od osy objektivu kamery kolem 50° . Při tomto úhlu se světlo procházející částicí láme a odráží tak, aby paprsky byly rovnoběžné s osou objektivu (viz obrázek 11- nalevo). Při zaznamenávání snímků kamerou je pak viditelná jedna částice jako dva jasné body (viz obrázek 11 - napravo). Vzdálenost těchto bodů je úměrná velikosti částice. [22]



Obrázek 11: Schéma (nalevo) a výsledný obraz (napravo) ozáření side illumination [22]

5.1.1.4 Continuous illumination

Kontinuální ozáření částic pomocí LED, nevyžaduje synchronizaci ozáření a kamery. Faktor ovlivňující ostatní parametry sondy s kontinuálním ozářením je doba expozice kamery. Čím kratší doba expozice tím kratší mohou být vzdálenosti které kapka urazí v rámci jednoho snímku. Tento jev vede ke dvěma poznatkům:

- 1) Při snížení doby expozice lze zachytit rychleji se pohybující částice.
- 2) Při snížení doby expozice lze pomocí čoček zmenšit pozorovaný objem a snížit tak velikost jednoho pixelu, což vede k vyššímu rozlišení a snížení dolní hranice rozptylu velikostí pozorovatelných částic. Zmenšení objemu však vede i k snížení horní hranice pozorovatelných částic.

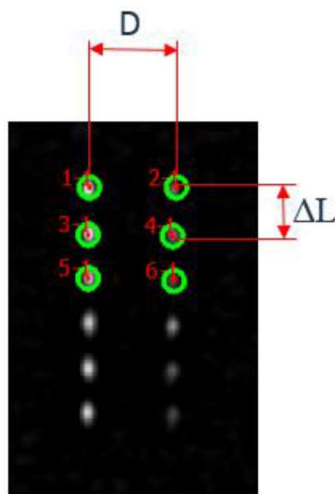
V turbínách obvykle nepřesahují rychlosti sekundárních kapek hodnoty přes 300 m/s, proto je zvolena takové přiblížení, které umožní zachycení celé dráhy těchto kapek. Metoda teoreticky může s dnešní technikou dosáhnout rozsahů měřených kapek od 10 do 1000 μm . [7, 10]

5.1.1.5 Pulsed illumination

Princip pulzního ozáření spočívá v ozáření kapek dvěma či více záblesky s tak malým časovým rozestupem, že jsou zachyceny na jednom snímku. Při metodě pulzního osvětlení je nutné přesně synchronizovat osvětlení s kamerou. Pulzní ozáření umožňuje snímat fotografie s relativně velkým zvětšením. Zvětšení ovlivňuje rozsah velikostí pozorovatelných částic, čím větší zvětšení, tím menší lze pozorovat částice. Při moc velkém zvětšení hrozí, že rychle se pohybující kapky opustí pozorovaný objem před ukončením doby expozice. To vede k chybám při analýze snímku. Podmínky pro výběr konkrétní LED pro systém měření kapalné fáze v parní turbíně metodou pulzního ozáření jsou následující:

- poskytovat dostatečně krátké světelné impulsy, aby se snížila, nebo dokonce eliminovala pohybová neostrost (takzvané „rozmazání obrazu“),
- poskytovat dostatečnou úroveň světelné energie během krátké doby expozice,
- řešit problémy spojené s omezeným prostorem uvnitř sondy,
- poskytnout více pulzů během velmi krátkého časového úseku.

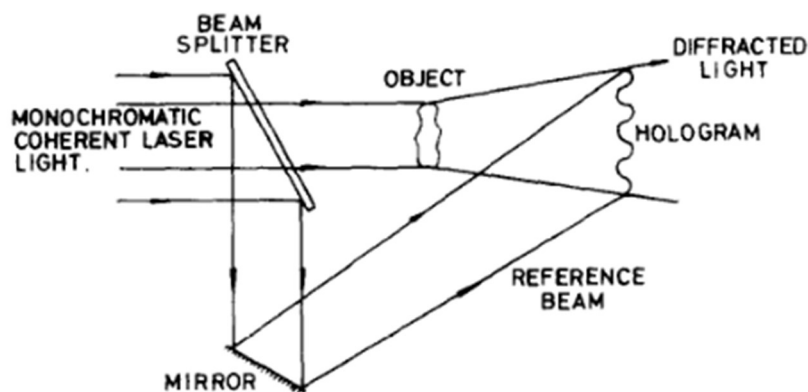
Výsledný obraz při použití pulzního LED ozáření v kombinaci s upořádáním „side illumination“ je na obrázku 12. Při ozáření pulzem je na jednom snímku obrazu vidět jedna pohybující se částice vícekrát. Vzdálenost mezi jednotlivými obrazy částice ΔL je úměrná délce, kterou částice urazila za dobu mezi pulzy zdroje ozáření. Velikost částice je úměrná velikosti D (vysvětlení v kapitole 5.1.1.3). [7, 22]



Obrázek 12: Výsledný snímek metody pulzního ozáření v uspořádání side illumination [22]

5.1.2 Holography

Výhodou této metody je použití hologramu, který na rozdíl od běžné fotografie dokáže zachytit třírozměrný rekonstruovatelný obraz. K vytvoření hologramu je potřeba dva koherentní monochromatické paprsky, které jsou rozděleny a následně spojeny, aby došlo k interferenci. Jeden paprsek je referenční a druhý ozařující. Ozařující paprsek prochází skrze pozorovaný objekt, v případě mokré páry tedy kapkou vody, tento průchod ovlivní fázi paprsku. Oba paprsky spolu interferují kvůli rozdílné fázi a vytváří tak hologram na citlivém fotografickém filmu. Hologram jako takový je pouze prostorový obraz v určitém časovém bodě a pro analýzu je nutné tento obraz rekonstruovat. Při rekonstrukci obrazu lze použít referenční paprsek, který ozaří hologram ze stejného směru jako tomu bylo při vytváření hologramu. Hologram slouží jako difrakční obrazovka pro referenční paprsek a vzniká vlnový obraz za hologramem, který je z hlediska pozorování ekvivalentní původnímu obrazu. Rekonstruované obrazy zachycených kapek lze pak pozorovat a analyzovat pomocí libovolného zvětšovacího optického zařízení. Schéma aparátu pro vytvoření hologramu je naznačené na obrázku 13 [25]



Obrázek 13: Princip metody holography, vytváření hologramu [25]

Používaným laserem je nejčastěji laser s rubínovým syntetickým krystalem nebo krystalem YAG (yttrito-hliníkový granát). Interval pulzu laseru se pohybuje kolem 10 ns. Hlavní výhodou metody holography je schopnost zobrazit částice proudící relativně vysokou rychlostí, a to s velkou hloubkou ostrosti, tedy pozorovaným objemem několika centimetrů krychlových. Hlavní omezení této metody jsou následující:

- 1) **Hustota částic.** Pokud je jich příliš mnoho, mohou ovlivnit referenční paprsek.
- 2) **Kritérium vzdálenosti.** Pro částice v závislosti na jejich průměru a vlnové délce existuje vzdálenost, kde poměr mezi signálem interference a šumu je moc malý a obraz nelze rekonstruovat.
- 3) **Kvalita a čistota optického systému.** Referenční vlny a vlny ovlivněné částicemi musí být co nejdokonalejší, aby se vytvořily dostatečně kontrastní snímky. Jakýkoli prach nebo poruchy kvality optického systému tyto vlny naruší.
- 4) **Velikost optického systému.** Problémem při použití v parní turbíně spočívá v omezení velikosti sondy. Řešením je použití laseru mimo sondu a vedení paprsku přes optická vlákna. Je však nutné zajistit, aby byl paprsek koherentní při vstupu do pozorovaného prostoru.

5.2 Metody na principu rozptylu světla a difrakce

Tyto optické metody fungují na základě chování záření ozařující částici kapalně fáze. Elektromagnetické záření je ovlivněno částicemi kapalně fáze v pozorovaném objemu. Při snímání tohoto sekundárního záření v různých směrech je možné určit vlastnosti částic v pozorovaném objemu. Pro určení těchto vlastností se využívá fyzikálních principů jako je teorie difrakce a rozptylu světla. Hledanými vlastnostmi částic jsou nejčastěji jejich rychlost a velikost a množství. Před představením jednotlivých metod je vhodné představit fyzikální principy, na kterých metody stojí. Tyto principy velmi dobře a detailně popsal Hulst [26].

5.2.1 Teorie difrakce a rozptylu světla

Při ozáření částic zpravidla dochází ke třem zásadním jevům: difrakce, absorpce a rozptyl světla. Pro analýzu velikosti kapek jsou vhodné hlavně jevy difrakce a rozptylu světla. Obecně lze tvrdit, že pro analýzu velikosti větších částic (sekundární kapky) je možné využít principy difrakce i rozptylu světla. Se snižujícím průměrem částice však začíná být dominantní pouze princip rozptylu světla a jeho vliv způsobuje největší pokles intenzity záření ve směru záření původního paprsku. Proto se pro analýzu velikostí menších částic (primární kapky) využívají právě principy rozptylu světla. Rozptyl lze popsat jako přeměrování záření pryč od původního směru šíření světla, a to ve všech směrech. Chování rozptylu světla se mění s měnícím se parametrem α definovaným v rovnici (5).

$$\alpha = \frac{\pi \cdot D}{\lambda} \quad (5)$$

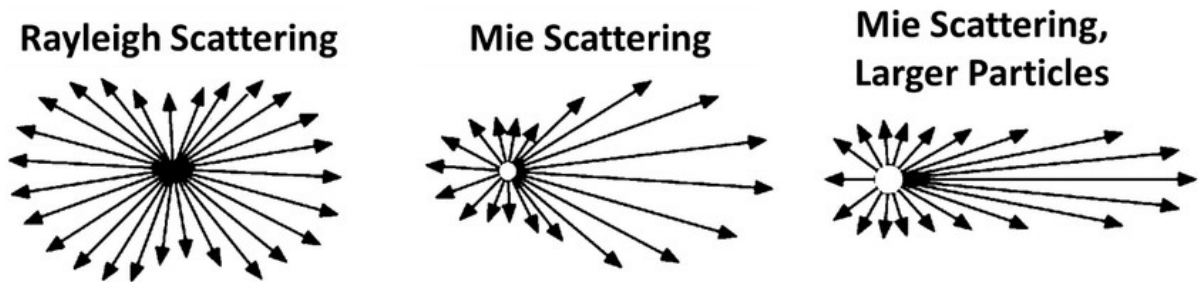
Pokud je pozorováno sekundární záření vzniklé po rozptylu světla lze pozorovat dramaticky rozdílné chování rozpadu v závislosti na parametru α . Obecně platí, že pokud se tento parametr zvyšuje, tak dochází k menšímu rozptylu a záření je více přímočaré. Chování rozptylu světla lze rozdělit podle parametru α do tří oblastí.

- 1) Chování v oblasti $\alpha < 0,02$ se nazývá **Rayleighovo rozptyl**. Kapky jsou malé a převažuje jev rozptylu světla do všech směrů, jak je vyobrazené na obrázku 14. Rayleighovo rozptyl je též specifický silným polarizačním efektem. Polarizační efekt je pozorovatelný například při ozařování malých částic v atmosféře slunečním zářením

a jeho důsledkem je dopadající modré světlo. Intenzita v této oblasti je úměrná šesté mocnině průměru kapky.

- 2) Chování v oblasti $0,02 < \alpha < 30$ je popsáno **teorií Mie**. Oblast se také nazývá oblast komplexního rozptylu. Intenzita v této oblasti je velmi citlivá na jakékoliv změny průměru kapky a také na úhlu pozorování, to se v diagramu intenzity světla v závislosti na průměru projeví oscilující křivkou právě v oblasti Mie.
- 3) Oblast $\alpha > 30$ lze považovat za oblast velkých kapek, kde se rozptyl světla plynule stává irelevantním a začínají být dominantnější **zákony geometrické optiky a difrakce**. Intenzita v této oblasti je úměrná druhé mocnině průměru kapky.

Toto rozdělení uvádí v svém článku Kleitz a Dorey [20] a je názorně vyobrazené na obrázku 14.



Obrázek 14: Znázornění rozptylu světla v závislosti na velikosti částice [27]

Pro nalezení poloměrů kapek je nutné zkoumat rozptyl světla homogenní koule pomocí Maxwellových rovnic s příslušnými okrajovými podmínkami. Tyto rovnice pro konkrétní zadání vyřešil Gustav Mie [28]. Jeho teorie bere v úvahu indexu lomu m , tvar částice a relativní permitivitu. Pro optické metody používané pro určení velikostí částic je nejdůležitější nalezení hodnot takzvaného extinkčního koeficientu Q_{ext} a rovnic s ním spjatých. [26]

5.2.2 Diffractometry

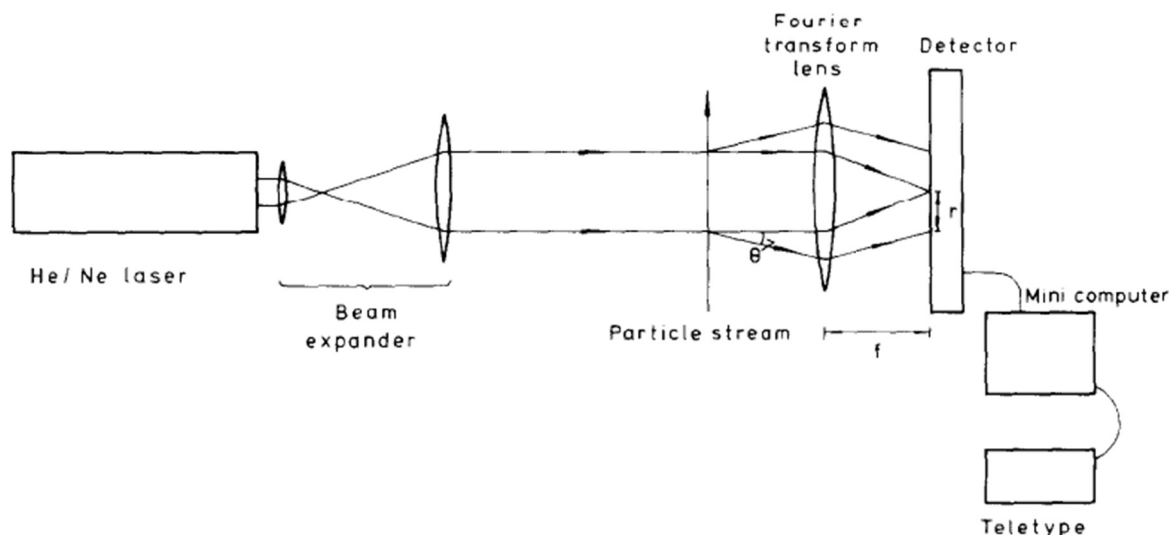
Při ozařování překážky elektromagnetickým zářením dochází k difrakci, a to zejména u částic v oblasti pro $\alpha < 30$. Difrakce je primárně určena poměrem vlnové délky a velikosti štěrbinu nebo překážky. Při měření sekundárních kapek lze použít Fraunhoferovu difrakční teorii pro nalezení distribuce velikostí kapek. Při měření intenzity lze použít rovnici (6) platnou v rovině ostrosti (anglicky „focus plane“). V této rovnici vystupuje kromě intenzit také Airyho funkce $Ai(X)$. Tato funkce závisí na bezrozměrném parametru X popsaném v rovnici (7). Vlivem difrakce se v rovině ostrosti zobrazí střídající se světlé a tmavé soustředné prstence. Pokud by byly všechny kapky stejně velké lze snadno najít charakteristický bod, tedy první minimum difrakce dané rovnicí (8). Pro měření dvoufázového proudění v parní turbíně se používá metoda, kterou lze aplikovat na soubor různě velkých kapek. Měření intenzity nahrazuje analýza rozložení energie záření v difrakčním obrazci a charakteristickým bodem je pak první maximum v rozložení energie záření. Z rovnice (6) lze vyčíslit světelnou energii uvnitř jakéhokoliv ze zmíněných prstenců. Toho se využívá při měření v parních turbínách, protože kapky vody mají různé velikosti. [20]

$$I = 2I_0 \cdot Ai(X) = 2I_0 \cdot \left(\frac{J_1(X)}{X} \right)^2 \quad (6)$$

$$X = \frac{\pi \cdot D \cdot l}{\lambda \cdot f} \quad (7)$$

$$y_1 = 1,22 \frac{\lambda \cdot f}{D} \quad (8)$$

Samotný optický systém, který lze použít pro analýzu velikosti částic je vyobrazen na obrázku 15. V tomto konkrétním uspořádání prochází rovnoběžné paprsky laseru přes pozorovaný objem, kde dochází k difrakci sekundárními kapkami. Rozptýlené paprsky prochází Fourierovou čočkou a dopadají na soustředné fotodetektory v ohniskové vzdálenosti čočky tak, aby byly schopné snímat difrakční obrazec. Difrakční obrazec je velmi komplikovaný, jde však pouze o superpozici jednotlivých difrakčních obrazců a pro řešení rozložení velikosti kapek je nutné řešení pomocí inverze komplexní matice (podobné jako se používá u extinkční metody). [7, 25]



Obrázek 15: Schéma optického systému pro měření metodou difrakce [25]

Problémy při aplikaci v parních turbínách jsou následující:

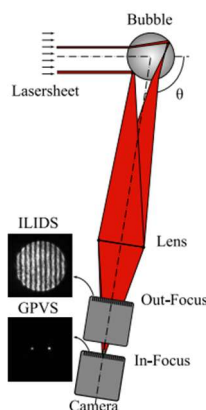
- 1) Nutnost zmenšení objektivu pro zachycení obrazu, ze které pramenní:
 - a. Omezená clona objektivu způsobuje že měřením je možné správně zaznamenat pouze malý difrakční úhel.
 - b. Na průměru objektivu probíhá druhotná difrakce rušící záření ovlivněné difrakcí způsobené kapkami. Čím menší průměr objektivu je tím větší je míra difrakce a tím horší je kvalita signálu.
- 2) Omezenost měření na sekundární kapky vody ($10 - 500 \mu m$) z důvodu negativního poměru mezi nízkým efektem difrakce od malé kapky a konstantním efektem druhotné difrakce od samotné čočky.

I přes tyto problémy byly navrženy, vytvořeny a testovány v praxi sondy založené na metodě difrakce. [20, 29]

5.2.3 Interferometric particle imaging

Tato metoda, často označovaná jako metoda IPI (z anglického „Interferometric particle imaging“) nebo ILIDS (z anglického „Interferometric Laser Imaging for Droplet Sizing“), umožňuje zjistit okamžitou velikost a prostorové rozložení průhledných nebo slabě absorpčních sférických částic (kapek a bublin). Princip metody IPI spočívá v ozáření roviny proudu pomocí koherentního svazku paprsků. V závislosti na úhlu pozorování lze na povrchu kapek pozorovat skrz čočku dva zářivé body. Tyto body vznikají vlivem lomu a odrazu světla dopadajícího na částici. Pokud se pozorování provádí v ohniskové vzdálenosti čočky jsou skutečně viditelné dva body. V tomto případě lze použít metodu GPVS (z anglického „glare point velocimetry and sizing“) pro zjištění rychlosti a velikosti částic. Pro metodu IPI se záření pozoruje z rozostřeného obrazu těchto bodů. Kamera tak zachycuje místo objektu interferenční obrazec,

který vzniká interakcí odražených paprsků. Frekvence opakování interferenčních maxim a minim na obrazci je závislá na vzdálenosti těchto bodů, tedy na velikosti kapky. Na obrázku 16 je vyobrazen optický systém pro pozorování bublin v laboratorních podmínkách na kterém jsou zobrazeny principy metod GPVS i IPI. Výhodou metody IPI je větší volnost ve volbě úhlu pozorování, což by mohlo být výhodou při vytváření sondy pro měření v parních turbínách s ohledem na omezenou velikost sondy. Bohužel velikost sondy je ovlivněna velikostí čočky, která je nepřímo úměrná velikosti částice. Při měření malých částic je proto požadovaná velká čočka. V laboratorních podmínkách se metodou IPI měří částice v rozmezí velikostí 20–280 μm . Bohužel nebyly nalezeny žádné články zmiňující sondy pro měření v parních turbínách na principu IPI. [30–33]

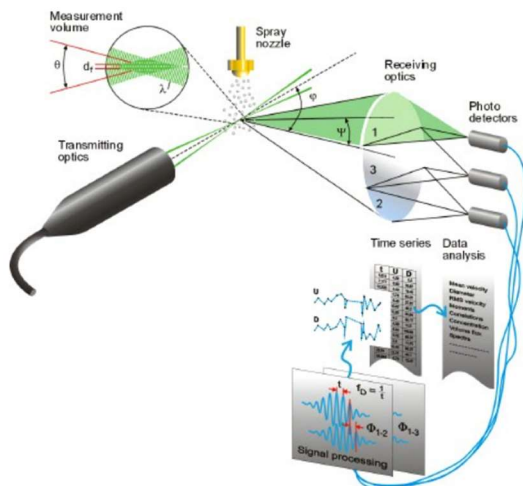


Obrázek 16: Názorné schéma principu fungování metody IPI (ILIDS) a GPVS [32]

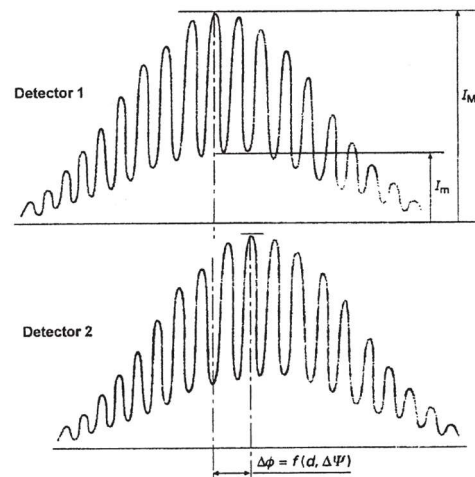
5.2.4 Phase doppler particle analysis

Princip této metody je založen na podobném principu jako metoda LDA, určená pro měření rychlosti částic. Metoda PDPA představuje navíc možnost měřit velikost částice. Pro laboratorní pozorování částic sprejů a aerosolů nabízí firma Dantec Dynamics zařízení, které funguje na tomto principu. Zařízení není použitelné pro měření uvnitř parní turbíny. Pro využití v turbíně je nutné i zařízení zmenšit. [34]

Fungování sondy využívá fyzikálního principu interference. Pozorovaný prostor je ozáren dvěma koherentními laserovými paprsky stejné vlnové délky. Na průsečíku těchto laserů vzniká interferenční obrazec, tedy obrazec obsahující střídající se světlé a tmavé pruhy. Kapka procházející pozorovaným prostorem je střídavě ozařována zářením o velké a malé intenzitě a podléhá principům rozptylu světla. Rozptýlené světlo je specifické kolísavou intenzitou v čase i prostoru a nese v sobě informaci o velikosti a rychlosti částice. Intenzita je zachycena fotodetektorech a porovnáním signálu lze najít vlastnosti pozorované částice. Schéma fungování metody je na obrázku 17. Rozdílné signály z fotodetektorů lze vyhodnocovat dvěma metodami. Metoda **phase doppler technique** vyhodnocuje okamžitý posun mezi modulovanými signály detektorů. Metoda **time shift technique** vyhodnocuje časový posun mezi maximy signálů. Porovnání fázového posunu signálů je vyobrazené na grafech na obrázku 18. Velikost částice se určuje na z naměřené rozdílu naměřené intenzity. Pro pozorování signálů velkých částic lze použít uspořádání, které zachycuje světlo odražené vlivem lomu a odrazu. V dostupné literatuře nebyla nalezena žádná sonda pro měření v PT, by toto uspořádání využívala. Důvodem může být složité zmenšení optického systému. Pro měření v PT byla vyvinuta sonda pro měření částic na pomezí primárních a sekundárních kapek. Tato sonda využívala uspořádání pro zachycení zpětného signálu v oblasti platnosti teorie Mie. [34–36]



Obrázek 17: Schéma fungování metody PDDPA [34]

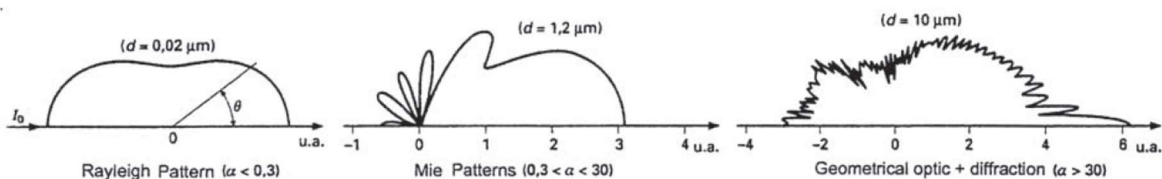


Obrázek 18: Fázový posun dvou signálů PDDPA [20]

Výhodou je, že metoda umožňuje měřit rychlost i velikost částice, navíc není potřeba zařízení kalibrovat. Nevýhodou je, že metoda nedokáže snímat více částic najednou a je nutné výsledky průměrovat a ideálně provést měření na více místech. Dalším problémem spočívá v zmenšování optického systému do malé sondy. Detektory musí zaujímat rozdílnou polohu v prostoru a být odchýleny od osy záření, tak aby zachytili rozpoznatelný fázový posun. Pro zmenšení do sondy určené k měření v PT se zdá být vhodné snímání zpětného rozptýleného světla. Toto uspořádání využil Kercel a dosáhl rozsahu od 0,9 do 3,6 μm , detaily jeho sondy jsou popsány v kapitole 6.1.10. [7, 34, 35]

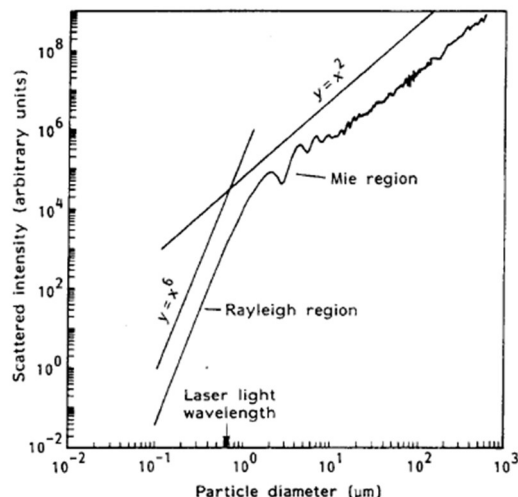
5.2.5 Light scattering

Metody fungující na principu light scattering (česky „rozptyl světla“) zaznamenávají záření vzniklé rozptylem původního záření I_0 ozařujícím částici. Toto záření rozvibruje elektrony atomů částice a vibrující elektrony vytvářejí vlastní elektromagnetickou vlnu, která je vyzařována do všech směrů. Částici lze v tomto okamžiku chápat jako samostatný zdroj záření s intenzitou I . Intenzita rozptýleného světla se mění v závislosti na parametru α a tím pádem i na velikosti kapky, jak je vidět na obrázku 19. [1, 20, 37]



Obrázek 19: Intenzita záření s v závislosti na úhlu pozorování θ a parametru α [20]

Na obrázku 20 je graf, který vykresluje měnící se intenzitu záření v závislosti na velikosti. Částice je ozářena zářením o konstantní vlnové délce označené jako „laser light wavelength“ zobrazené na ose x.



Obrázek 20: Graf intenzity rozptýleného světla v závislosti na poloměru [38]

Pro kapky s větším průměrem, pro které platí zákony geometrické optiky, se intenzita zvyšuje úměrně kvadrátu průměru kapky. Pro kapky v oblasti Rayleighova rozptylu se intenzita zvyšuje úměrně průměru kapky na šestou. V oblasti Mie rozptylu intenzita v závislosti na měnícím se průměru osciluje. Při použití větší čočky lze zachytit větší úhel signálu a tím pádem lze docílit hladší křivky intenzity. Pokud se zachycuje dopředné záření (záření ve směru původního záření), tak lze dosáhnout vyšších hodnot detekované intenzity oproti detekovanému šumu, což umožňuje přesnější měření. Zařízení lze rozdělit podle zdroje záření na zařízení pro větší kapky se zdrojem bílého světla a na zařízení pro menší kapky s laserem jako zdrojem záření. Pro metody na fungující na principu rozptylu světla obecně platí následující chyby:

- 1) snímání chybného signálu při přítomnosti více částic v pozorovaném objemu,
- 2) snímání chybného signálu při částečném průchodu částice měřeným objemem,
- 3) chyby způsobené interferencí,
- 4) chyby způsobené měnící se intenzitou původního záření I_0 .

Některé z těchto problémů lze omezit, například zmenšením pozorovaného objemu lze redukovat chybu způsobenou snímáním více částic najednou. Problémy, které se nepodaří zcela odstranit vhodně zvolenou konstrukcí sondy je nutné zohlednit při vyhodnocování hodnot z měření. [1, 20, 39]

V literatuře je možné se setkat s názvy sond fungujících na principu light scattering rozdělené podle úhlu pozorování rozptýleného světla θ . V následujících kapitolách jsou postupně probrány znaky, výhody a nevýhody daných rozdělení.

Pokud je úhel pozorování $\theta = 0^\circ$, pak se většinou jedná o metodu „extinction“ (popsaná v kapitole 5.2.6). Diskutovaná metoda „light scattering“ i metoda „extinction“ fungují na podobném principu, ale u extinkční metody je intenzita pozorovaného záření daná úbytkem intenzity vlivem rozptylu. U metody light scattering je pozorován právě tento úbytek mimo osu původního záření ($\theta \neq 0^\circ$ a $\theta \neq 180^\circ$). Zástupci jednotlivých rozdělení jsou v bližších detailech popsáni v kapitole 6.1.

5.2.5.1 Back-scatter probes

Tyto sondy jsou definovány úhlem pozorování θ ležícím v rozsahu od 90° do 180° . Tyto sondy zachycují signál rozptýlený zpět ke zdroji záření. Záření je zaměřeno do velmi malého pozorovacího objemu, kde dochází k ozáření právě jedné částice. Kvůli tomu je nutné použít statistické metody a zajistit dostatečně dlouhý časový interval měření. Částice vyzařuje

rozptýlené světlo ve všech směrech. Světlo rozptýlené směrem k sondě prochází čočkami a je zachyceno fotodetekty uvnitř sondy. Fotodetekty transformují intenzitu zachyceného světla na elektrický signál, který je veden tělem sondy do výpočetního zařízení umístěného mimo sondu. Analýza získaného signálu probíhá na stejném principu jako metoda útlumu světla (neboli metoda „extinction“ popsána v kapitole 5.2.6), tedy ze vztahů pro výpočet kalnosti podle teorie Mie a Beer-Bourger-Lambertova zákona. [39]

Výhodou těchto sond je ozáření prostoru vzdáleného od sondy (například trojnásobek poloměru hlavice sondy) tak, aby procházející částice nebyly ovlivněny přítomností sondy. Sondu není nutné kalibrovat. Nevýhodou je velký vliv chyby, pokud pozorovaným objemem prochází více než jedna částice, což může být problémem při sondování v prostorech s velkou koncentrací kapek. Při návrhu sondy se musí brát v úvahu slabá intenzita záření rozptýleného částicí zpět ke zdroji záření. Ideální pozorovací úhel pro snímání záření s největší intenzitou je pro sekundární kapky (s průměry od 40 do 100 μm) úhel od 138° do 160° . Nebyla nalezena žádná literatura, která by popisovala sondu na principu v uspořádání „back-scatter“ schopnou určit rychlost částice. [39]

5.2.5.2 Side-scatter probes

Tyto sondy jsou definovány úhlem pozorování $\theta = 90^\circ$. To znamená, že zaznamenané záření je záření rozptýleného paprsku. Nebyla nalezena žádná sonda, kterou bylo provedeno úspěšné měření uvnitř parní turbíny. Teoreticky by bylo možné sondu zkonstruovat a vyhodnotit získaný signál vztahů pro výpočet kalnosti podle teorie Mie a Beer-Bourger-Lambertova zákona (stejně jako u teorie „back-scatter“).

5.2.5.3 Forward-scatter probes

Tyto sondy jsou definovány úhlem pozorování θ ležícím v rozsahu od 0° do 80° , reálné sondy však byly navrženy pro úhel θ v rozsahu od 0° do 30° . Tyto sondy zachycují záření rozptýlené ve směru původního záření. Metoda je snadno zaměnitelná s metodou „diffractometry“ popsané v kapitole 5.2.2, rozdíl však spočívá hlavně v rozdílném parametru α . Metoda „diffractometry“ pracuje na zákonech geometrické optiky (principy Fraunhoferovy difrakční teorie) a poměr velikosti částice a vlnové délky α je větší než 30. Pro metodu zachycení záření rozptýleného ve směru původního záření je nutné, aby se parametr pohyboval v rozmezí $0,02 < \alpha < 30$, tedy aby byly platné rovnice teorie Mie. [26, 40]

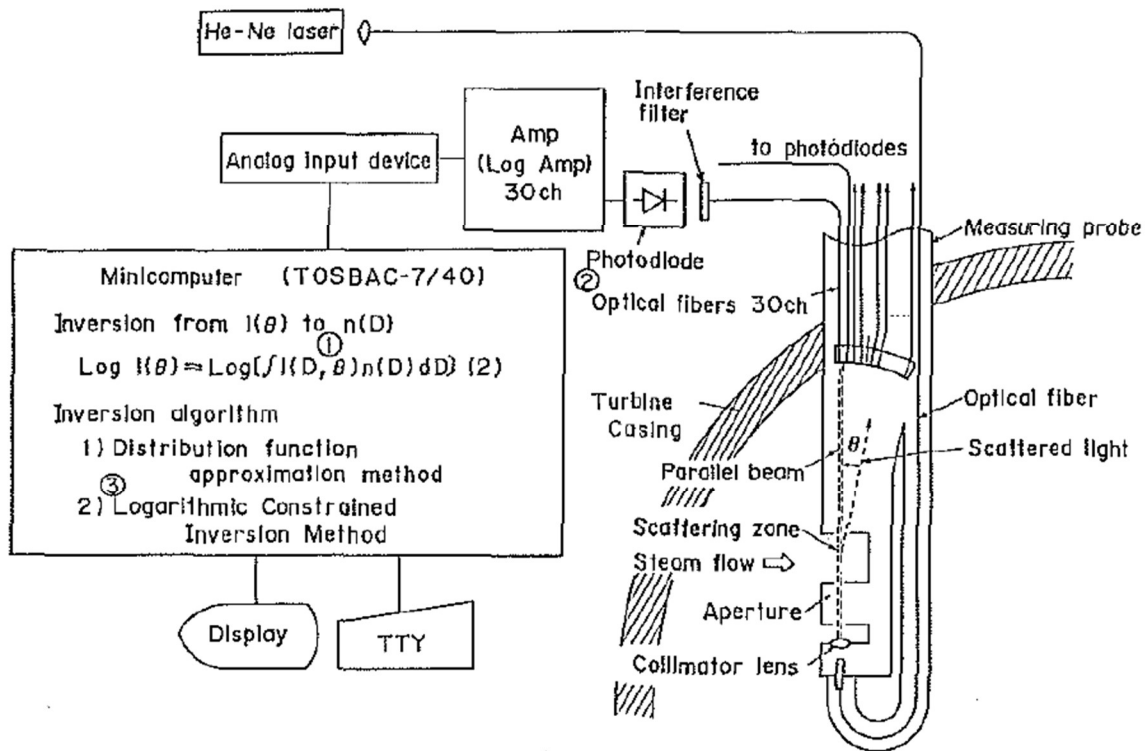
Princip metody je znázorněn na obrázku 21 a spočívá v ozáření několika částic pozorovaného objemu monochromatickým světlem. Jako přijímače záření jsou použity desítky optických vláken ve směru původního záření v různých úhlech (například 0° ; $0,5^\circ$; 1° ; $1,5^\circ$ atd.). Přijaté světlo je optickými vlákny vedeno k fotodiodám. Fotodiody přeměňují intenzitu rozptýleného světla na elektrické signály. Vyhodnocení probíhá pomocí inverze vzoru intenzity $I(\theta)$ na rozložení velikostí kapek $\Phi(D)$. Vztah pro tyto veličiny se nachází v rovnici (9).

$$I(\theta) = \int I_i(D, \theta) \cdot \Phi(D) \cdot dD \quad (9)$$

Intenzita záření vedená optickým vláknem I_i je funkcí průměru kapky, vlnové délky původního záření, relativního indexu lomu a pozorovacího úhlu. Pokud jsou index lomu vody a vlnová délka zdroje světla známé a pokud je pozorovací úhel θ daný geometrií a intenzita měřená, tak jedinou neznámou je průměr částice. Podmínky pro platné vyhodnocení této metody jsou následující:

- 1) Kapalná fáze se v pozorovaném objemu vyskytuje pouze ve tvaru kulatých sfér
- 2) Světlo dopadající na fotodetekty je nepolarizované a nekoherentní.

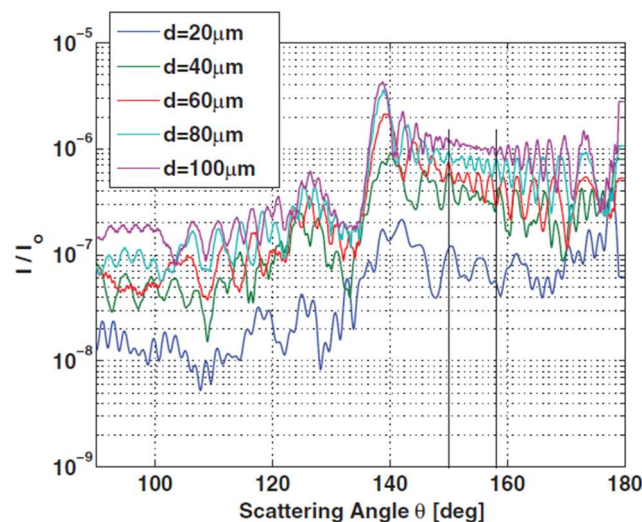
Při pozorování malých částic a při použití kolimátoru (optická soustava vytvářející rovnoběžné světelné svazky) vícevidového optického vlákna lze považovat tyto podmínky za splněné. [40]



Obrázek 21: Schéma sondy na principu forward scattering [40]

5.2.5.4 Určení ideálního pozorovacího úhlu θ

Bosdas [39] při návrhu svojí sondy pracující na principu rozptylu světla použil program pro nalezení řešení Maxwellových rovnic pomocí teorie Mie. Cílem tohoto programu bylo zjistit jaký úhel je vhodné použít pro pozorování rozptýleného zpětného záření pro získání největší intenzity. Konkrétní výsledky jsou uvedeny v grafu na obrázku 22. Graf ukazuje poměrnou intenzitu rozptýleného světla v závislosti na úhlu pozorování a na průměru kapky.



Obrázek 22: Graf útlumu intenzity pro zpětné pozorovací úhly v závislosti na velikosti kapky [39]

Je doporučeno, aby byla provedena podobná analýza při návrhu sondy na principu metody „light scattering“. Pro analýzu je nutné znát následující parametry:

- 1) Vlnová délka zdroje záření (v grafu použitý zdroj s $\lambda = 632 \text{ nm}$)
- 2) Průměry hledaných kapek (v grafu použity průměry od 40 do 100 μm)
- 3) Geometrie sondy (graf byl vytvořen za účelem nalezení ideálního pozorovacího úhlu „back-scatter“ sondy, proto byl vyhodnocen jen pro úhly $90^\circ > \theta > 180^\circ$)

5.2.6 Extinction

Extinkční metoda je nejčastěji používaná metoda pro měření rozložení velikostí primárních kapek. Tyto kapky jsou často menší než 1 μm , pohybují se velmi rychle a v pozorovaném prostoru jich je mnoho. Tato metoda se řadí mezi metody pracující na principu rozptylu světla (viz kapitola 5.2.5), od předchozích metod se liší v úhlu pozorování ($\theta = 0^\circ$) a metodách vyhodnocení, proto pro ni byla vyhrazena samostatná kapitola. Principem extinkční metody je pozorování zeslabení neboli útlumu záření. Měřenou veličinou je redukovaná intenzita ve směru původního paprsku. Intenzita se zeslabuje dvěma mechanismy a to absorpcí I_{abs} (anglicky „absorption“) a rozptylem I_{sca} (anglicky „scattering“). Tento poznatek popisuje rovnice (10). [25]

$$I = I_0 - (I_{sca} + I_{abs}) \quad (10)$$

Vztah mezi dvěma intenzitami popisuje též Beer-Bourger-Lambertův zákon o přenosu světla v rozptylovém prostředí, popsáný v rovnici (11). Tento zákon intenzitu redukovaného záření I vyjadřuje jako funkci původního záření I_0 , kalnosti τ (anglicky „turbidity“) a délce měřeného prostoru L . Vyjádřením kalnosti z rovnice (11) lze nalézt vztah obsahující zlomek s oběma měřenými intenzitami. Použitím Mie teorie o rozptylu světla v kombinaci s upraveným Beer-Bourger-Lambertovým zákonem je možné vyhodnotit průměr kapek D a rozložení těchto průměrů $\Phi(D)$. Tento vztah je popsán rovnicí (12) a lze z něj usoudit, že zeslabení (poměr intenzit) je funkcí délky pozorovaného objemu, poloměru částice a součinitele rozptylu světla (extinkčního koeficientu Q_{ext}).

$$I = I_0 \cdot e^{-\tau \cdot L} \quad (11)$$

$$\tau = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \cdot \frac{1}{L} = \frac{\pi}{4} \int_0^{D_\infty} Q_{ext}(D, \lambda_i, m) \cdot \Phi(D) \cdot D^2 \cdot dD \quad (12)$$

Součinitel rozptylu světla popisuje, jak účinný je proces rozptylu, tj. čím vyšší je Q_{ext} , tím více světla je rozptýleno, a proto se zvyšuje útlum ve směru původního paprsku. Tento součinitel lze pro homogenní sféru získat z Maxwellových rovnic pomocí teorie Mie. Součinitel je funkcí vlnové délky ozařujícího světla, průměru sféry a relativního indexu lomu. Pro měření v prostoru obsahujícím více než jednu pozorovanou částici je nutné využít více vlnových délek, proto při výpočtu odpovídá počet rovnic n počtu použitých vlnových délek. Pro každou rovnici je použitý jiný index $i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$. Při vyšším počtu použitých vlnových délek je získáno více informací, ale je nutné řešit více rovnic. Pro vyřešení těchto rovnic je využita podobnost s Fredholmovými integrálními rovnicemi a lze použít jednu z následujících metod:

1. Přístup inverze matice
2. Přístup prokládání křivky

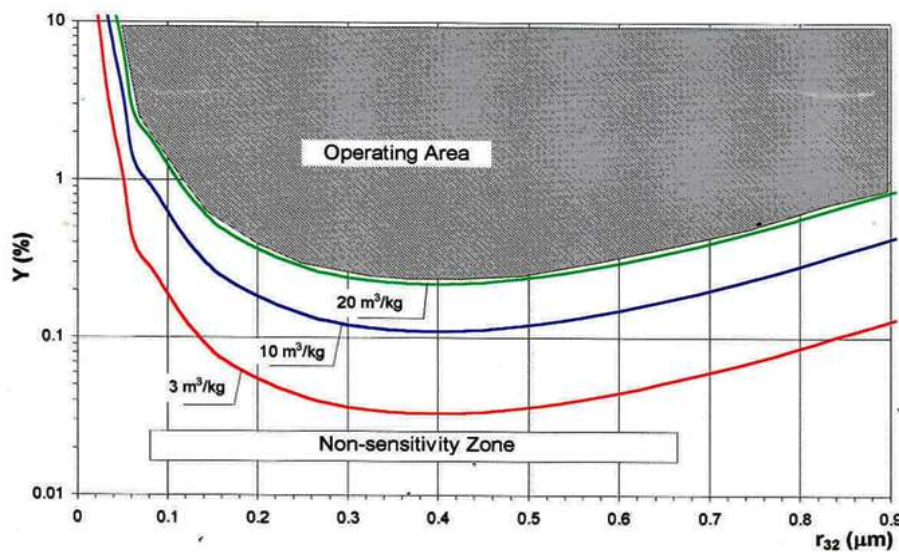
Řešení této soustavy rovnic je velmi citlivé na jakoukoliv změnu vstupních hodnot, a proto je nutné pracovat s velmi přesným měřicím systémem. [2, 7, 20, 41]

Na základě rovnice (13) použité při měření Kolovratníkem [2] je možné určit hodnoty vlhkosti páry v místě měření.

$$y = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi}{6} \cdot \frac{\rho'}{\rho''} \int_{D_0}^{D_\infty} \Phi(D) \cdot D^3 \cdot dD \right)^{-1}} \quad (13)$$

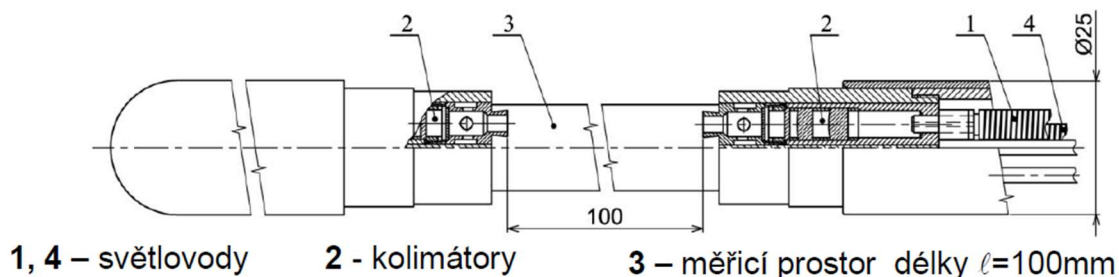
Nevýhodami extinkční metody jsou:

- 1) velmi náročné vyhodnocení při nízké hustotě kapek (viz graf na obrázku 23 zobrazující pole využití extinkčních sond),
- 2) neschopnost měřit kapky mimo oblast Mie rozptylu kdy přestává být platný výpočet Q_{ext} , (proto je pro úplnost měření vhodné využít sondu která je schopná měření sekundárních kapek). [40]



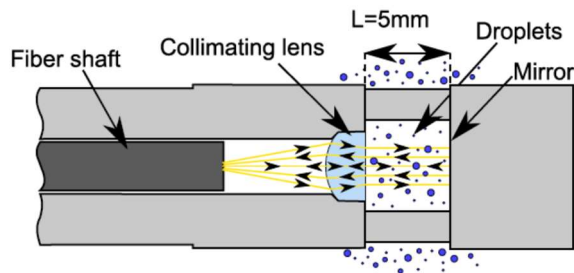
Obrázek 23: Pole použití extinkčních sond v závislosti na vlhkosti a velikosti částic [42]

Optický systém pro uspořádání 1 je vyobrazen na obrázku 24, kde světlo prostupuje pozorovaným objemem pouze jednou, světlo je vedeno z jedné strany sondy přes čočku do pozorovaného objemu a ovlivněné světlo vystupuje z pozorovaného objemu přes čočku do fotodetektoru. [3]



Obrázek 24: Schéma extinkční metody pro uspořádání 1 [3]

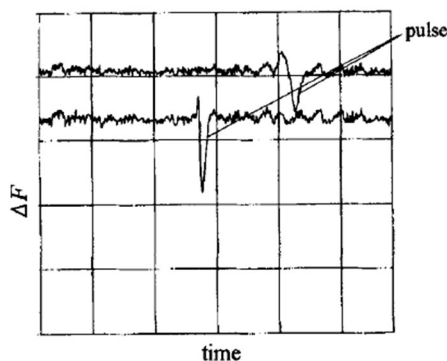
Optický systém pro uspořádání 2 je vyobrazen na obrázku 25, kde zdroj světla je veden optickým vláknem skrz sondu a poté prochází skrz čočku do pozorovaného objemu. Světlo prochází objemem dvakrát, protože se odrazí od zrcadla na špičce sondy a poté opět prostupuje čočkou a je snímáno fotodetektorem. [41]



Obrázek 25: Schéma extinkční metody pro uspořádání 2 [41]

5.2.7 Light fluctuation method

Metoda světelných fluktuací funguje na principu extinkční metody, ale byla vyvinuta se záměrem pozorování sekundárních kapek vody. U extinkční metody je intenzita dopadajícího světla I_0 zeslabena v důsledku rozptylu světla primárních kapek. Koncentrace a velikost primárních kapek v proudu páry je na jednom místě téměř konstantní, pokud jsou provozní podmínky parní turbíny konstantní. Proto je také intenzita záření ovlivněného částicemi téměř konstantní. Při průchodu hrubé částice dojde k pulzu při pozorování intenzity. Velikost, rychlost a koncentrace sekundárních kapek se výrazně mění s časem a polohou. Výška a šířka pulzu (amplituda a doba trvání redukce světelného signálu) souvisí s velikostí a rychlostí sekundárních kapek, signál obsahující pulz je v grafu na obrázku 26. Analýzou signálu pomocí teorie světelných fluktuací a korelační teorie můžeme získat koncentraci, velikost a rychlost sekundárních kapek. [43]



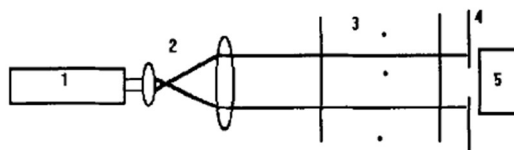
Obrázek 26: Pulz světelné energie v závislosti na čase [43]

Fotodetektor zaznamenává konstantní světelnou energii F_1 spojenou s intenzitou I_1 utlumenou primárními kapkami s poloměry D_1 . Tuto závislost popisuje rovnice (14). Pokud pozorovaným objemem projde sekundární kapka o poloměru D , tak světelná energie na fotodetektoru F_2 bude rozdílná o ΔF od energie F_1 . Tento rozdíl lze popsat rovnicí (15). Tato rovnice obsahuje součinitel rozptylu světla Q_{ext} , který je funkcí vlnové délky, relativního indexu lomu a poloměru částice. Q_{ext} se vyhodnocuje se využitím teorie Mie. Na základě těchto dvou rovnic lze určit vzorec pro výpočet poloměru sekundární kapky. Tento vzorec je zapsaný v rovnici (16). Optický systém je vyobrazen na obrázku 27. [43]

$$F_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \cdot I_1 \quad (14)$$

$$\Delta F = F_1 - F_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot I_1 \cdot Q_{ext} \quad (15)$$

$$D = D_1 \sqrt{\frac{\Delta F}{F_0 \cdot Q_{ext}}} \quad (16)$$



1 light source 2 optical system 3 measurement zone
4 light aperture 5 photo-detector

Obrázek 27: Schéma optického systému pro metodu light fluctuation [43]

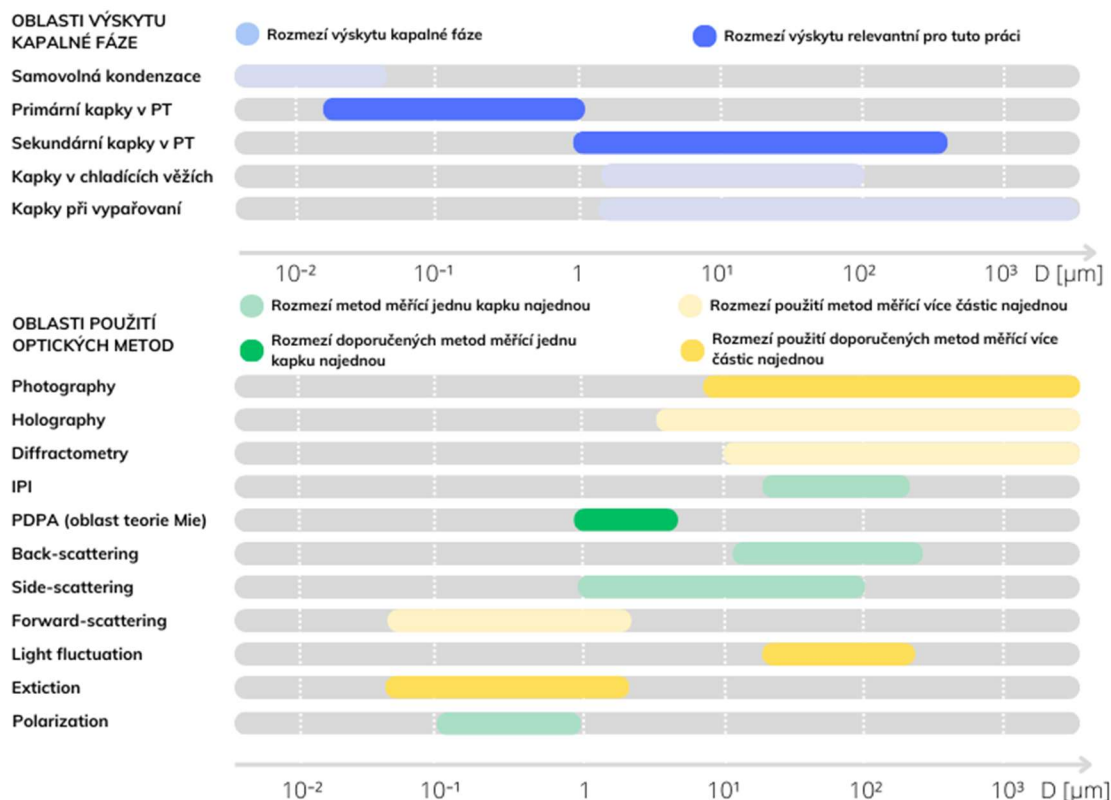
5.2.8 Polarization

K částečné polarizaci dochází při ozařování částice elektromagnetickým zářením. Toto záření rozvibruje elektrony atomů částic a vibrující elektrony vytvářejí vlastní elektromagnetickou vlnu, která je vyzařována do všech směrů. Tento efekt se nazývá obecně rozptyl světla. Pokud rozptýlené světlo osciluje pouze v jedné rovině tak se nazývá polarizované. Vlivem rozptylu může vzniknout částečně polarizované světlo, tento efekt je nevýraznější při ozařování velmi malých částic ($d \leq 1 \mu m$), tedy v oblasti Rayleighova rozptylu. [20, 37]

Pro měření rozložení velikostí se využívá poměru mezi kolmými a rovnoběžnými polarizovaných složek rozptýleného záření. Tento poměr je úměrný průměru částice, která rozptyl způsobila. Metoda byla ověřena v laboratorních podmínkách s velkou přesností pro monodisperzní proud částic. Nebyly nalezené žádné články, které by dokazovaly využití této metody v sondě pro měření kapalně fáze v parní turbíně [20, 38, 44]

5.3 Porovnání jednotlivých metod

Optické metody, které jsou teoreticky použitelné pro měření v náročných podmínkách parní turbíny, byly stručně popsány na základě rešerše dostupné literatury. V této kapitole je provedeno porovnání jednotlivých metod. V první části se nachází graf (obrázek 28), který popisuje, jak velké kapky lze měřit jednotlivými metodami. Součástí grafu jsou i rozmezí výskytu kapalně fáze na základě velikosti kapek. V dalších kapitolách jsou postupně porovnány jednotlivé metody pro měření primárních a sekundárních kapek. Pro určení vlhkosti, ztrát vlivem vlhkosti a vlivu na erozi lopatek je nutné pozorovat všechny částice v proudu mokré páry. Tím pádem je vhodné provádět kompletní řešení pomocí jedné sondy pro měření vlastností primárních kapek a druhé sondy pro měření vlastností sekundárních kapek. Na základě průzkumu dostupné literatury lze prohlásit, že dosud nebylo realizováno měření v PT obsahující informace o celém spektru velikostí a dalších vlastnostech částic kapalně fáze. Některé sondy byly navrženy jako kombinované se snahou spojit měření primárních i sekundárních kapek. Detaily o těchto sondách jsou popsány v kapitole 6.1.



Obrázek 28: Graf popisující oblasti výskytu a použitelné metody v závislosti na poloměru částice

5.3.1 Porovnání metod pro primární kapky

Pozorování množství a průměrů primárních kapek je nutné pro určení vlhkosti v daném bodě parní turbíny. Pomocí změřených dat lze předpovídat hodnoty termodynamické ztráty vlhkostí. Lehké primární kapky jsou dokonale unášeny proudem páry. Není tedy nutné měřit rychlost a směr proudění kapek, ale stačí měřit proudové pole páry. To se obvykle v PT měří pneumatickými sondami. Více metod a detaily o měření rychlosti v PT popsal Kleitz [20].

Nejvyužívanější metodou pro toto měření je jednoznačně metoda „extinction“ tedy metoda pracující na útlumu světla. Jejímí výhodami je přesné měření několika kapek najednou. Rozsah měření je shora omezen hranicí okolo 2 μm , po překročení této hranice přestávají platit zákony používající se pro nalezení rozložení průměrů kapek. Nevýhodou je že využití extinkčních sond může být omezeno pro určité hodnoty vlhkosti. Například při použití mimo spodní hranici rozsahu vlhkosti může docházet k nedostatečnému útlumu intenzity I při porovnání s intenzitou referenčního paprsku I_0 . Při použití nad horní hranicí pak dochází k opačnému jevu. Intenzita I je moc slabá na to, aby jí senzory detekovaly a výpočet není možné přesně realizovat. I přes tyto nevýhody je metoda útlumu světla doporučenou technikou pro měření primárních kapek.

Metoda „forward scattering“ má největší potenciál konkurovat metodě „extinction“. Obě metody jsou hodně podobné a pro určení velikostí částic používají stejné fyzikální principy. Metoda není doporučena hlavně z důvodu nedostatku literatury, která by naznačovala přesvědčivé výsledky z měření na parních turbínách.

Metoda „polarization“ není doporučena pro návrh sondy. Její rozsah použití je výrazně menší a nepřináší žádné výhody oproti metodě „extinction“. Metoda nebyla nikdy využita pro měření uvnitř PT.

5.3.2 Porovnání metod pro sekundární kapky

Pozorování chování sekundárních kapek má hlavní vliv na předpovídání eroze lopatek. Sekundární kapky zaujímají hmotnostní podíl kapalně fáze proudění menší než 5 %. Při tomto pozorování jsou významnými veličinami velikost, množství, rychlost a směr kapek unášených proudem. Výhodou pro sondy navržené k pozorování sekundárních kapek může být větší pozorovací objem, obzvláště při nízkých hodnotách vlhkosti, kdy je množství sekundárních kapek nízké.

Sondy na principu „photography“ by se mohly stát primární metodou pro měření sekundárních kapek. Jejich výhodou je relativně velký pozorovaný objem, který dokáže zachytit částice i při nižších vlhkostech. Rozsah použití je široký a hodí se pro měření velikostí a rychlostí sekundárních částic. Výhodou metody „Photography“ je fakt, že se senzory a kamery s dobou velmi rychle vyvíjí a jsou dostupné kvalitní a kompaktní kamery. Tyto kamery a další části optického systému se vejdou do relativně malé hlavičky sondy. Debata může vyvstat nad otázkou uspořádání hlavičky, tedy polohy pozorovaného objemu vůči poloze kamery a poloze ozáření. Ozáření může být pulzní nebo kontinuální. Z dostupné literatury zatím není jasné, které uspořádání a které ozáření je nejvhodnější.

Metoda „holography“ není doporučena hlavně kvůli její rychlosti pořizování dat. Pokud je nutné měřit kapky v oblasti s nízkou vlhkostí, tak je náročné načasovat vytvoření hologramu tak, aby byla nějaká částice zachycena.

Metoda „diffractometry“ je vhodná pro měření velikostí sekundárních kapek. Oblast použití je dostatečně velká a spadá do ní většina sekundárních kapek. Nevýhodou metody je neschopnost měřit rychlost kapek, což je zásadní pro předpovídání eroze. Proto je tato metoda doporučena pouze pokud je cílem měřit velikosti sekundárních kapek. Pro měření vlivu na erozi tato metoda není vhodná.

Metoda „light fluctuation“ je specifická pro svojí kombinace měření primárních i sekundárních kapek. Rozsah měření sekundárních kapek je omezený a sondy používající tuto metodu zatím nejsou schopny měřit více než jednu sekundární kapku najednou. Přesto má metoda „light fluctuation“ nejbližší k měření primárních i sekundárních kapek pomocí jedné sondy.

Metoda „Interferometric particle imaging“ nebyla využita pro sondu na měření v PT. Metoda vyžaduje optický systém, který je náročné zmenšit pro využití v parní turbíně.

Metoda „Phase doppler particle analysis“ je metoda umožňující měření velikosti i rychlosti částice, což je výhodou při měření sekundárních kapek. Metodou lze měřit velké částice pomocí lomu a odrazu světla, ale optický systém takového uspořádání se zatím nepodařilo zmenšit pro měření v PT. Metodou lze měřit i malé částice, pokud je fotodetektory snímané rozptýlené světlo v oblasti platnosti teorie Mie. V této oblasti se rozsah při měření rozptýleného světla pohybuje mezi 1 a 8 μm . Tohoto rozsahu by bylo možné využít při sestavení sondy pro měření oblasti využití, která spadá mezi rozsahy metod „extinction“ a „photography“. Použití všech tří metod by mohlo vést k měření kapek všech velikostí. Metodu proto lze doporučit, však pouze k doplnění měření ostatními metodami. Nevýhodou metody PDPA je malý pozorovaný objem, který způsobuje časově náročné měření pro místa s nízkou vlhkostí.

Metoda „Light scattering“ (v uspořádání „back-scatter“ a „side-scatter“) není doporučena pro pozorování sekundárních kapek. Důvodem je omezený rozsah pozorování, který je platný pouze v oblasti platnosti rovnic teorie Mie. Sondy na principu „light scattering“ mají často malý pozorovaný objem a nejsou schopné měřit rychlost částic, což limituje jejich využití.

5.4 Další metody měření velikosti částic

Metody pro měření velikosti částic různými způsoby přehledně shrnul Azzopardi [25]. Pro úplnost této práce zde budou nastíněny i ostatní metody, kterými lze měřit vlhkost. Účelem tohoto shrnutí je rozšířit obzory o zajímavé metody a přidat alternativu k metodám optickým, které jsou sice nepoužívanější, ale není pravidlem, že jsou vždy nejlepším řešením pro měření velikosti kapek.

6 Pracoviště zabývající se optickými sondami

Cílem této kapitoly je chronologicky shrnout vývoj optických sond a používaných metod. V podkapitolách jsou vypsány jednotlivá pracoviště a detailněji popsány jednotlivé sondy.

6.1 Vývoj sond

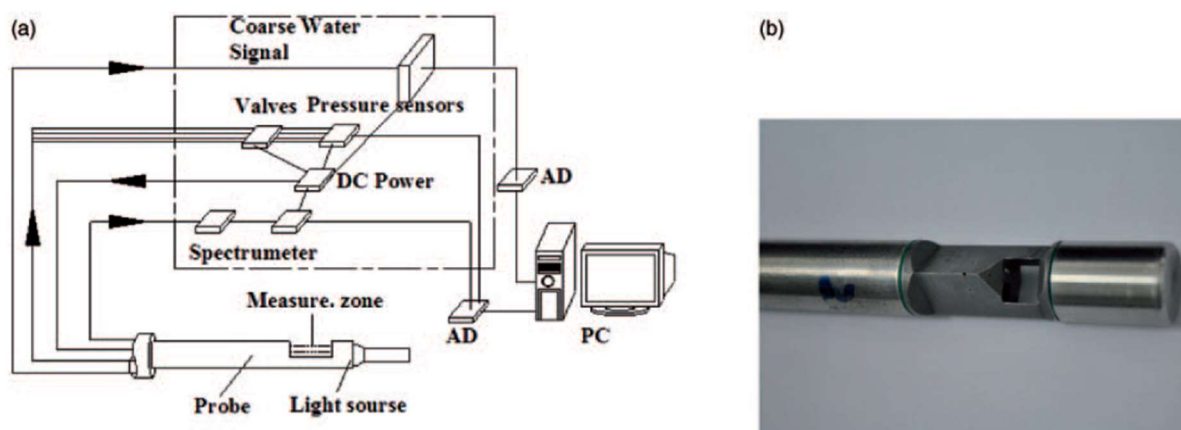
První sondy pro měření velikosti kapek byly vyvinuty okolo roku 1970. Cílem těchto sond bylo měření kapek v atmosféře za účelem zpřesnění modelů pro předpověď počasí. Tyto sondy fungovaly na principech analýzy obrazu anebo měření intenzity rozptýleného světla pro kapky okolo 300 μm . Na konferenci IMechE v roce 1976 byl prezentován příspěvek Ederhofa a Dibeliuse [45] o sodně snímající rozptýlené světlo pod úhlem 90°. Sondu fungující na metodě útlumu světla (metoda „extinction“ popsaná v kapitole 5.2.6) navrhl v roce 1980 Walters [46] a v roce 1982 ho následoval svým návrhem sondy na stejném principu Kantola [47]. Sondu fungující na principu pozorování rozptýleného světla ve směru sondy na principu forward scattering navrhl v roce 1986 Tatsuno [40]. Sonda, která byla využita pro měření hmotnostního průtoku sekundárních kapek a vodních filmů v turbíně na principu absorpce byla navržena Youngem [48]. V roce 1992 byla publikována práce o zhotovené extinkční sondě z petrohradského CKTI. Na této sondě se podíleli Dobkes a Feldberg (sonda je popsána v článku od Khomenoka [49]). Jiný přístup pro měření primárních kapek než metoda útlumu světla navrhl a realizoval v roce 1993 Kercel [36]. Kercel použil metodu pozorování zpětného rozptylu světla a podařilo se mu naměřit částice do velikosti 3,6 μm . V roce 2007 navrhl Schatz [50] kombinovanou sondu pro měření tlaku a rozložení velikosti částic kapalně fáze s využitím extinkční metody. Použitím této sondy byly změřeny i velmi malé kapky (0,5 μm). Relativně novou sondou je videosonda, kterou navrhl Xueliang [51]. Sonda je určena pro měření sekundárních kapek, a to o průměrech od 10 do 400 μm . V České Republice k vývoji sondy přispěl hlavně Kolovratník a Petr [3], kteří vyvinuli pro Ústav energetiky fakulty strojní na ČVUT sondu na principu útlumu světla M1, tato sonda byla úspěšně použita na měření v elektrárnách v provozu (Temelín, Počerady). Na úspěch extinkční sondy navázal Bartoš [10] se svým návrhem sondy na principu „Photography“ pro měření sekundárních kapek. V roce 2014 navrhl Cai sondu ve které zkombinoval metody pro měření primárních kapek (extinkční metodu s využitím více vlnových délek), sekundárních kapek (light fluctuation method) a měření proudového pole pomocí čtyřtvarové tlakové sondy. Tato sonda umožnila měření kapek o průměrech až 400 μm . V roce 2015 publikoval Bosdas [39] článek o sondě na principu měření zpětného rozptylu světla s průměrem hlavice 5 mm. Sonda je schopná měřit sekundární kapky o velikostech od 40 do 110 μm .

6.1.1 USST v Šanghaji

Profesor Xiaoshu Cai z ústavu technologie měření částic a dvoufázového proudění na univerzitě v Šanghaji pro vědu a výzkum (USST) je jeden z aktivních výzkumných akademických pracovníků zabývajících se návrhem optických sond pro měření vlhkosti a rozložení velikosti částic v parních turbínách. Vyvinul 2 sondy a podílel se na vývoji dalších optických sond pracujících na různých principech.

Light fluctuation extinction probe je první sondou pracující na principu metody „light fluctuation“ (kapitola 355.2.7), která je schopná měřit primární i sekundární kapky. Sonda má průměr pouhých 20 mm a její délku je možné přizpůsobit různým parním turbínám až do 6 m. V článku o sondě je uvedena chyba až 50 % způsobená měřením pod úhlem a tím pádem vlivem rozptylu světla, proto Cai představuje koeficient, který koriguje výsledky s ohledem na vliv rozptylu. V článku nejsou uvedeny velikosti ani rychlosti kapek, které je schopná sonda rozpoznat. [43]

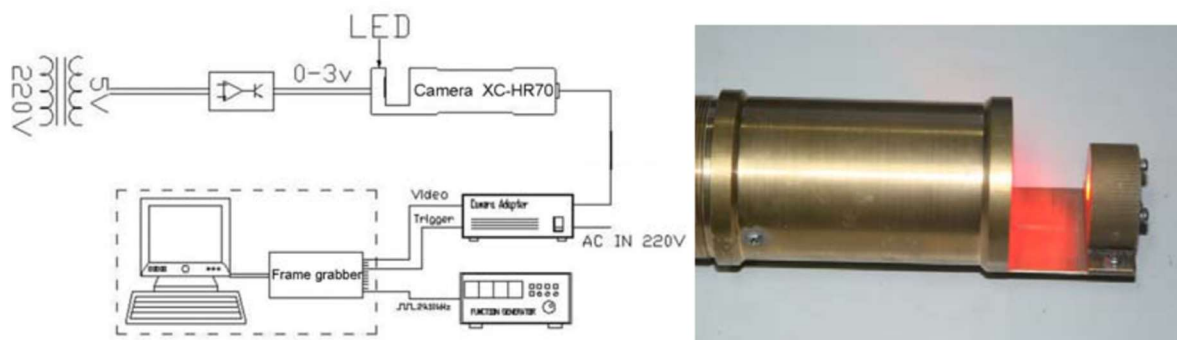
Combined pneumatic and light fluctuation probe je sonda, která přinesla kombinaci měření pomocí metody light fluctuation (kapitola 355.2.7), s pneumatickou sondou. Výsledkem je systém, který je schopen měření primárních kapek (za účelem určení vlhkosti) i sekundárních kapek (průměry od 50–400 μm). Hlavice sondy má průměr 20 mm a délka hlavice s trubicí může dosáhnout až 6 m pro měření na turbínách 1000 MW. Schéma sondy a samotná sonda jsou vidět na obrázku 29. Sonda byla prověřena na reálné parní turbíně 350 MW a výsledky ukazovaly rychlosti až 160 m/s. [52]



Obrázek 29: Kombinovaná extinkční pneumatická sonda (a) schéma; (b) fotografie [52]

Následující sondu vyvinul Xueliang Fan, výzkumný pracovník Šanghajske univerzity, profesor Xiaoshu Cai pouze spolupracoval na jejím vývoji.

Video probe measurement system byl vyvinut za účelem měření sekundárních kapek pomocí metody zachycení obrazu (kapitola 5.1.1). Systém (vyobrazen na obrázku 30) umožňuje snímání 30 snímků za sekundu a výhodou je velmi krátká doba expozice a to až 10 μs , což umožňuje zachycení rychle se pohybujících částic. Na základě kalibrace bylo zjištěno, že pozorované pole má rozměry 3,9 x 2,95 mm a rozlišení snímku je 1024 x 768. To znamená, že 1 pixel odpovídá velikosti 3,8 μm . Rozptyl velikostí měřitelných vodních kapek je od 10 μm do 400 μm . Měření rychlosti kapek se vyhodnocuje pomocí rozmazaných snímků letící kapky. Při známé době expozice lze spočítat rychlost z dráhy kapky. V laboratorních podmínkách byly naměřeny rychlosti do 6 m/s. Nebyly nalezeny žádné články o měření v reálné turbíně touto sondou. [51]

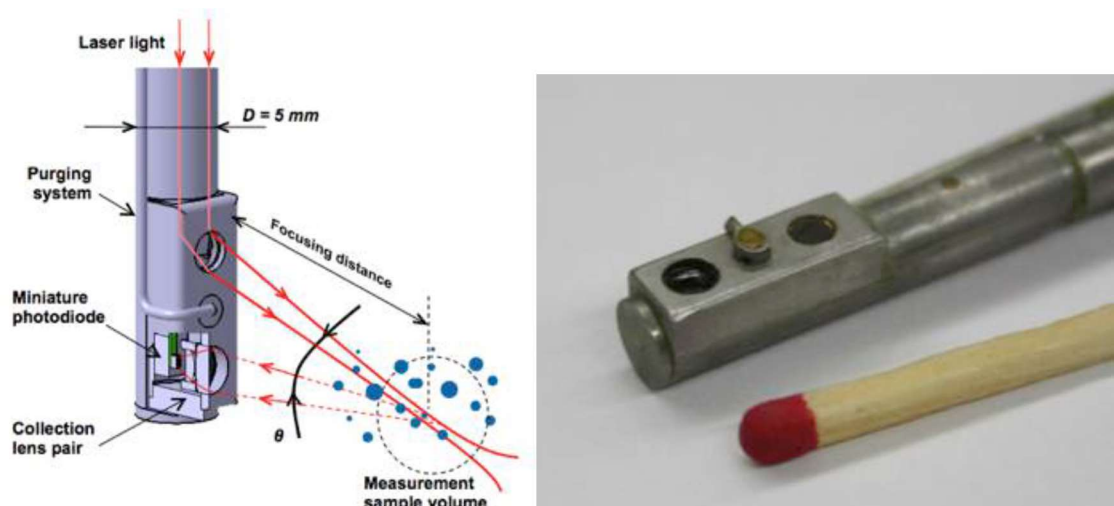


Obrázek 30: Videosonda vyvinuta USST Šanghaj (a) schéma; (b) fotografie [51]

6.1.2 ETH Zürich

Katedra strojního a procesního inženýrství na univerzitě ETH v Curychu ve spolupráci s výzkumnými pracovníky z Aristotelovy univerzity v Soluni a švýcarskou firmou Limmat Scientific se zabývá vývojem sond pro měření vlhkosti páry a rozložení velikostí kapek v parních turbínách.

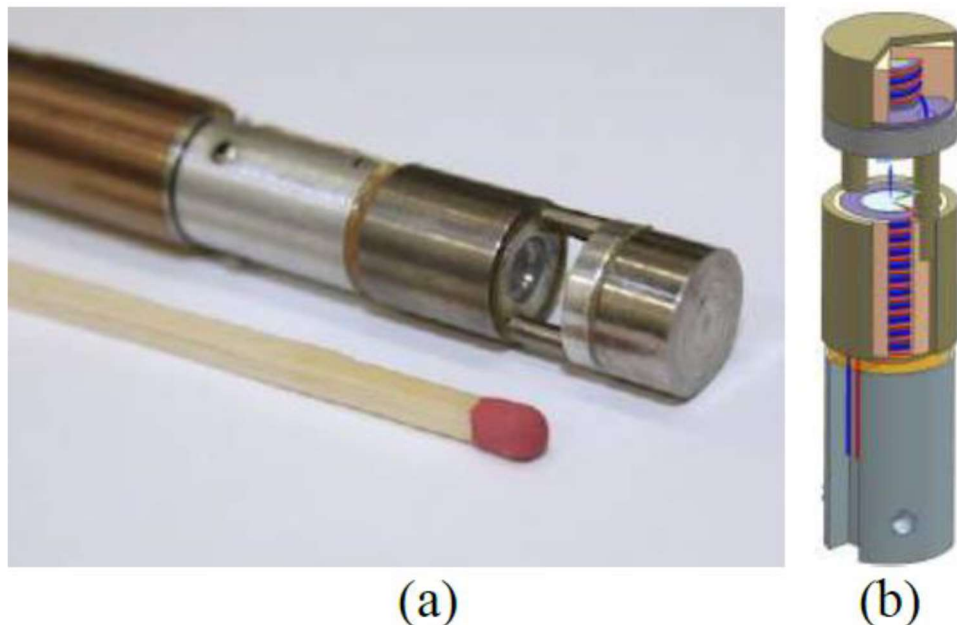
FRAP-OB („fast response aerodynamic probe for optical measurements“) je sonda pro měření sekundárních kapek v parní turbíně. Tato sonda je optickou sondou zachycující zpětný rozptyl (metoda „back-scatter“ popsaná v kapitole 5.2.5.1), která má zabudovanou miniaturní fotodiodu schopnou měření kapek o rychlostech až 170 m/s. Sonda má průměr hrotu 5,5 mm a délku 1,3 m. Rozsah měření průměrů kapek je od 30 do 110 μm s podílem vlhkosti do 12 %. Světlo je vedeno dovnitř hrotu sondy optickým vláknem a poté je zaostřeno do pozorovaného objemu. K tomuto účelu se používá monochromatický He-Ne laser ($\lambda=632$ nm). Když částice procházejí měřeným objemem vzorku, rozptylují světlo, které je díky optickým čočkám zachyceno fotodiodou. Hrot sondy je navíc vybaven systémem na principu stlačeného vzduchu, aby se okénka udržovala čistá od případné kontaminace vodou. Sonda je navržena tak, aby vydržela teploty do 120 $^{\circ}\text{C}$. Sonda byla testována uvnitř experimentální turbíny Mitsubishi, kde byly uměle generovány částice kapalné fáze. Schéma fungování a fotografie sondy jsou na obrázku 31. [53]



Obrázek 31: Sonda FRAP-OB na principu light scattering [53]

Extinkční vyhřívaná sonda je další sondou, kterou vyvinul tým pod vedením Bosdase. Sonda je specifická tím, že v sobě má systém vyhřívání, který chrání elektroniku a optický systém uvnitř sondy před poškozením vodou. Využívaná metoda je metoda útlumu světla ve směru záření (kapitola 5.2.6). Další zajímavostí je malá velikost sondy hlavičky (viz

obrázek 32), její průměr je 9,4 mm. Výhodou malých rozměrů je, že se sonda vejde do otvorů v parních turbínách určených pro měření pneumatickými sondami. Sonda byla navržena a úspěšně testována pro měření kapek o velikostech 0,2 až 10 μm . [41]

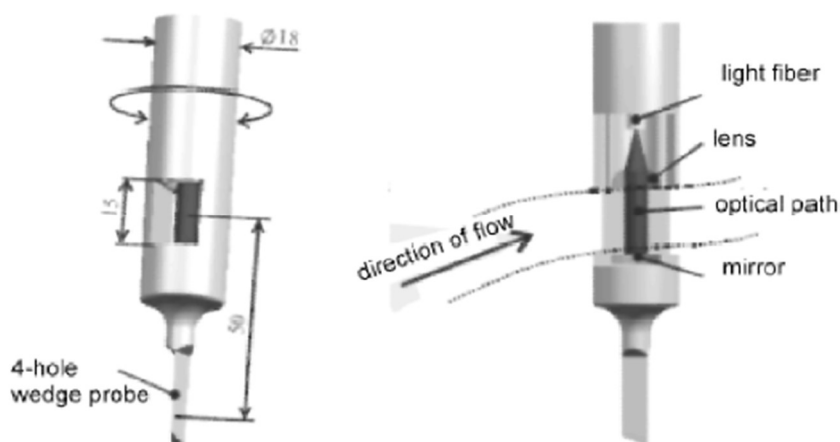


Obrázek 32: (a) Vyhřívaná extinkční sonda (b) Model vyhřívané extinkční sondy [41]

6.1.3 ITSM na Univerzitě v Stuttgartu

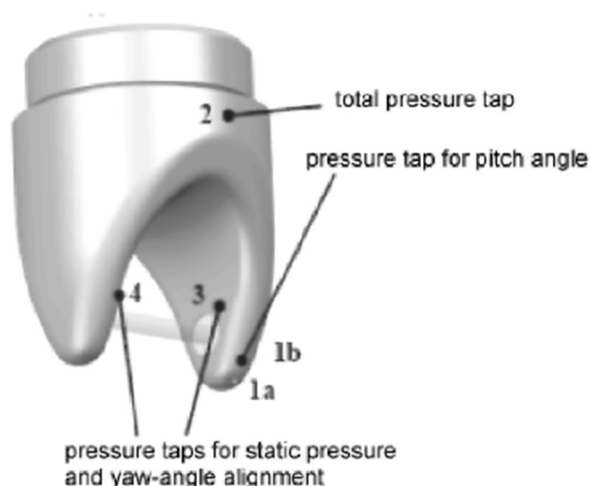
Pracovníci na Ústavu pro tepelné proudové stroje ve Stuttgartu už od roku 1982 pracují na vývoji optických sond pro měření vlhkosti páry. První sondu z laboratoří ITSM vyvinul Wang [54], její nevýhodou bylo nutné měření pneumatickou sondou odděleně od měření optickou sondou pro měření vlhkosti. Na základě tohoto nedostatku začali pracovníci ústavu vyvíjet kombinovanou sondu pro optické měření a pneumatické měření na jedné hlavici. Vývoj této sondy měl tři fáze a vznikly sondy třech generací. Sondy všech tří generací fungují na principu metody „extinction“ (kapitola 5.2.6).

Sonda první generace (viz obrázek 33), kterou vyvinul Renner [55], umožnila současné měření celkového a statického tlaku, teploty, úhlu proudění a spektra kapek, což kromě úspory času při měření zvýšilo přesnost optického měření díky zlepšenému vyrovnaní sondy do proudu.



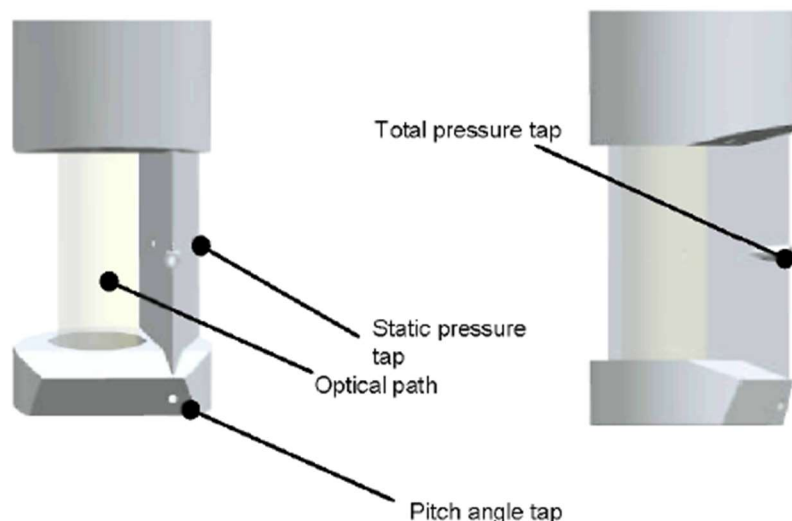
Obrázek 33: ITSM - Kombinovaná pneumatická extinkční sonda první generace [50]

Sonda druhé generace (viz obrázek 34), navržená Seiboldem [56], se omezovala svým tvarem interakci s proudící párou. Orientace optického pozorovaného objemu se změnila ze svislé na vodorovnou, se záměrem zlepšit rozpoznání odlišností proudění v radiálním směru. Bohužel se podařilo realizovat pouze prototyp sondy s průměrem hlavy 25 mm, který nebyl vhodný pro měření v nepříznivých podmínkách parní turbíny.



Obrázek 34: ITSM - Kombinovaná pneumatická extinkční sonda druhé generace [50]

Sonda třetí generace (viz obrázek 35), navržená a vyvinutá Schatzem a Caseym [50], se navrátila k vertikální orientaci pozorovaného objemu. Průměr hlavy sondy je 10 mm. Pro sběr dat se používá CCD-spektrometr SD2000 od společnosti OceanOptics. Frekvence snímání dat je 333 Hz. Spektrometr je připojen k PC pomocí USB. Testování sondy proběhlo na modelu parní turbíny v laboratořích ITSM. Rozsah velikostí kapek, které byly naměřeny, se pohyboval od 0,4 do 3,1 μm . Předpokladem pro rychlost primárních kapek je jeho rovnost s prouděním páry. Proudění páry lze měřit pneumatickou částí sondy.



Obrázek 35: ITSM - Kombinovaná pneumatická extinkční sonda třetí generace [50]

6.1.4 CKTI v Petrohradu

Výzkumný institut v Petrohradu se zabývá vývojem a výzkumem v oblasti energetiky a turbín. Místní výzkumníci v čele se jmény jako Dobkes a Feldberg spolupracovali na vývoji a testování mnoha optických sond a ve spolupráci dalšími pracovníky institutu vyvinuli i vlastní níže zmíněné sondy.

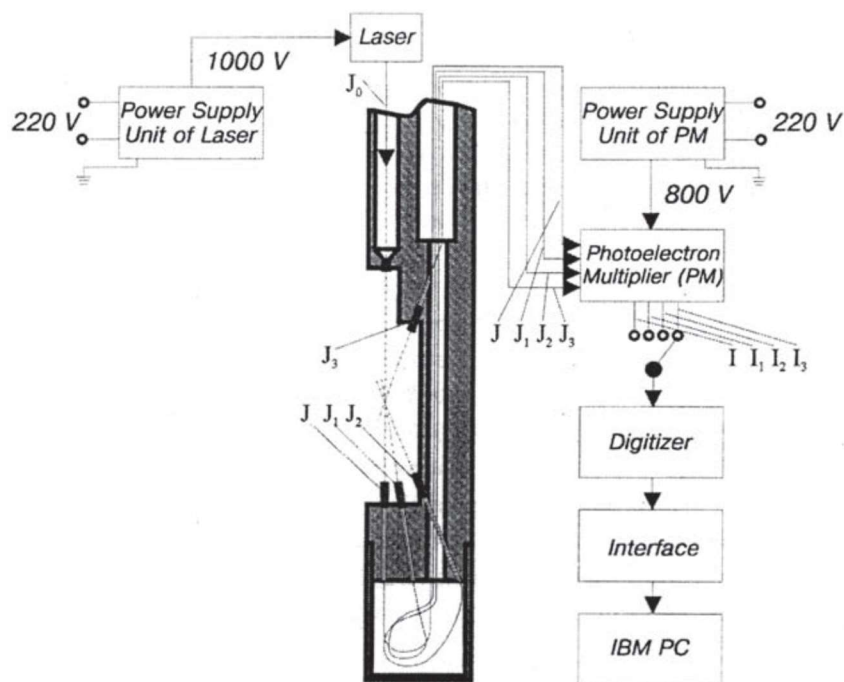
Extinkční sonda byla první sonda, která byla vyvinuta institutem CKTI. Byla využita metoda útlumu světla (kapitola 5.2.6), která však fungovala na odlišném principu než ostatní doposud vyvinuté sondy. Zdroj světla byl původně omezen pouze na dvě vlnové délky. Tato konfigurace umožnila výpočet vlhkosti pomocí Sauterova středního průměru D_{32} (tedy průměru kapky jejíž poměr povrchu k objemu se rovná střední hodnotě poměrů povrchu k objemu všech kapek v daném rozdělení velikostí). Vztah pro výpočet D_{32} se nachází v rovnici (17).

$$D_{32} = \frac{\sum n_i D_i^3}{\sum n_i D_i^2} \quad (17)$$

Tento postup výpočtu byl jednodušší než výpočet pomocí inverzní matice pro získání spektra rozdělení velikosti kapek. Sonda byla později upravena použitím zdroje světla vyzářujícího osm vlnových délek, což umožnilo přesnější měření. Nebyly nalezeny žádné články popisující geometrii, zařízení nebo možnosti použití této sondy. Fotografie hlavičky sondy je ve vrchní části obrázku 37. [7, 20]

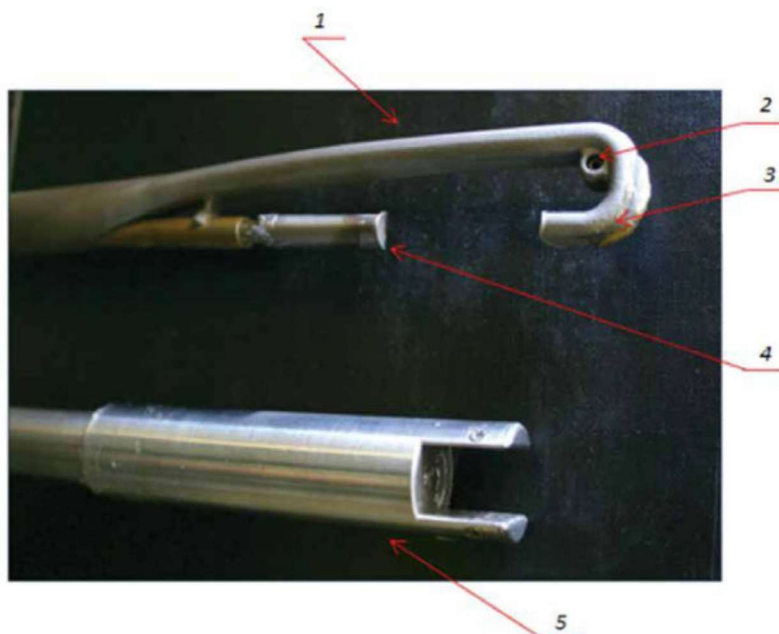
Kombinovaná extinkční a rozptylová sonda byla kombinací zmíněné extinkční sondy pro měření primárních kapek (kapitola 5.2.6) a sondy na principu light scattering pro měření kapek sekundárních (kapitola 5.2.5). Sonda byla vyvinuta ve spolupráci s MEI (Moskevským energetickým institutem) a její schéma je vyznačeno na obrázku 36. Zdrojem elektromagnetického záření je helium-neonový laser (na obrázku 36 označen J_0). Pro měření sekundárních kapek byly použity tři fotodetektory (na obrázku 36 označen J_1, J_2, J_3). J_1, J_2 , jsou umístěny pod pozorovacími úhly $\theta_1 = 8^\circ$ a $\theta_2 = 20^\circ$ a jsou určeny pro měření velkých kapek na principu forward scattering. Fotodetektor J_3 je určen pro měření malých primárních kapek a je umístěn pod pozorovacím úhlem $\theta_3 = 160^\circ$. Pro měření primárních kapek je použita metoda útlumu světla pracující na podobných principech jako extinkční metoda. Vyhodnocení však opět funguje na principu nalezení Sauterova středního průměru D_{32} (tedy průměru kapky

jejíž poměr povrchu k objemu se rovná střední hodnotě poměrů povrchu k objemu všech kapek v daném rozdělení velikostí). [20, 49]



Obrázek 36: Schéma kombinované sondy CKTI [20]

Videosonda s pulzním osvětlením je vyobrazena v dolní části obrázku 37. Osvětlení tvoří 4 pulzní LED s průměrnou vlnovou délkou 905 nm. Tyto diody jsou umístěny v pozici „side illumination“ a poskytují pulzy záření s minimální dobou trvání jednoho pulzu 30 ns (kombinace uspořádání z kapitoly 5.1.1.3 s osvětlením z kapitoly 5.1.1.5). Kamera disponuje rozlišením 5 mega pixelů, jeden pixel je úměrný čtverci o velikosti 2,2 μm . Sonda je schopná měřit rychlost a směr proudění kapek v rozsahu od 0,1 do 300 m/s a velikosti kapek v rozsahu od 20 do 600 μm . Sonda byla otestována na experimentální turbíně v Petrohradu. [22]



(1 – hlavice extinkční sondy, 2 – termočlánek, 3 – přijímač záření, 4 – posuvný zdroj záření, 5 – hlavice videosondy)

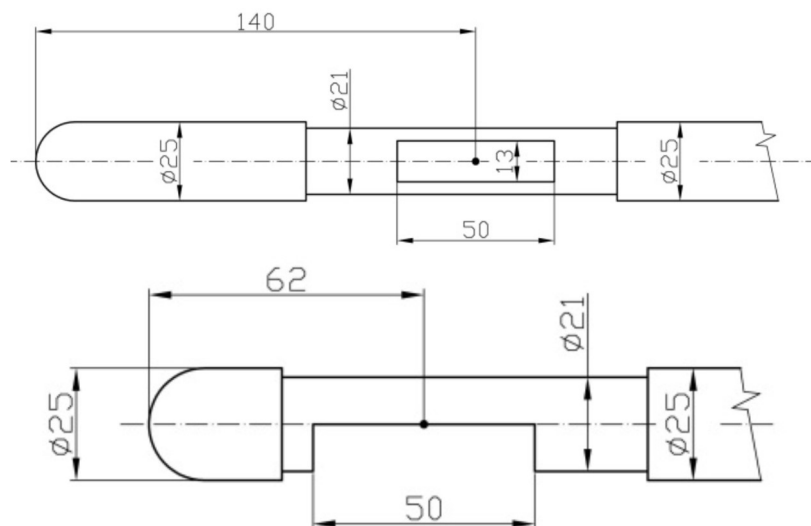
Obrázek 37: CKTI Sondy pro měření primárních a sekundárních kapek [49]

6.1.5 Ústav energetiky na ČVUT

Problematikou kapalně fáze v parních turbínách se zabývá mnoho výzkumných a akademických pracovníků z Ústavu energetiky Fakulty strojní ČVUT. Metodou útlumu světla a extinkčním sondám se dlouhodobě věnuje Michal Kolovratník. Ondřej Bartoš publikoval články věnující se zkoumání sekundárních kapek v parní turbíně pomocí sondy na principu „photogrammetry“ (fotografická metoda).

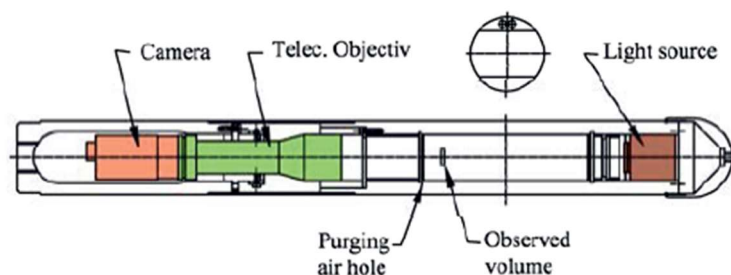
Extinkční sonda M1 je sondou pravidelně používanou pro měření primárních vlhkosti v parních turbínách. Sonda pracuje na principech metody útlumu světla (5.2.6). Hlavní rozměry sondy jsou zakreslené v horní části obrázku 38. Pozorovaný objem, kterým proudí mokrá pára, se nachází v obdélníkovém okénku sondy 50x13 mm. Pára je ozářena zářením z deuterio-halogenového zdroje ($\lambda = 200 \div 1000$ nm) přes optické vlákno. Optické vlákno je i na druhém konci pozorovaného objemu, za účelem zachycení a následné analýzy utlumeného světla.

Sonda M1 byla navržena pro měření za posledním lopatkovým stupněm. Pro měření před posledním lopatkovým stupněm byla navržena sonda **extinkční sonda M2**, která má kratší hlavici a pozorovaný prostor je ohraničen pouze z jedné strany (viz obrázek 38 – dole). Optický systém se liší od původní sondy, ale jeho části nejsou v dostupné literatuře popsány.



Obrázek 38: CVUT - Extinkční sonda M1 (nahore) a M2 (dole) [57]

Photogrammetry probe (neboli fotogrammetrická sonda) byla vyvinuta za účelem měření sekundárních kapek v parních turbínách Bartošem [10], na konstrukci sondy se podílel i Nedoma [58]. Uspořádání sondy a osvětlení, které mají vliv na fungování sondy, jsou popsány v kapitolách 5.1.1.1 a 5.1.1.4. Sonda je uzavřena v trubce z nerezové oceli 50 x 3 mm. Hlava sondy je navržena tak, aby se vysunula z trubky až v místě měření, a tak se snížilo nebezpečí poškození při vsouvání sondy do turbíny. Kamera a objektiv jsou v hlavici sondy na jedné straně a kontinuální zdroj světla LED je upevněn na straně druhé (viz obrázek 39). Okénka optického systému jsou chráněna před ulpíváním kapek stlačeným vzduchem. Předpokládá se, že vliv ochranné vzduchové clony na měření je zanedbatelný.



Obrázek 39: Schéma fotografické sondy s kontinuálním osvětlením [10]

Použitá kamera od firmy iDS s rozlišením 1280x1024 pixelu zajišťuje dobu expozice 9 μ s. Za tuto dobu kapka pohybující se rychlostí 200 m/s zanechá čáru dlouhou 1,8 mm. Jeden pixel odpovídá čtverci se stranou 5,3 μ m v pozorované rovině. Sonda byla testovaná na turbíně 200MW. Autoři uvádí teoretické rozmezí měřených průměrů kapek od 10 do 1000 μ m. Bylo zjištěno, že u sondy s tímto uspořádáním mohou vznikat falešné sekundární kapky, které se otrhávají od povrchu sondy a poté procházejí pozorovaným objemem. Z toho důvodu se autoři věnují návrhu sondy se zdrojem světla na straně objektivu a kamery (přední ozáření). Fotografie hlavičky fotogrammetrické sondy je na obrázku 40. [10]



Obrázek 40: Fotografie fotogrammetrické sondy [57]

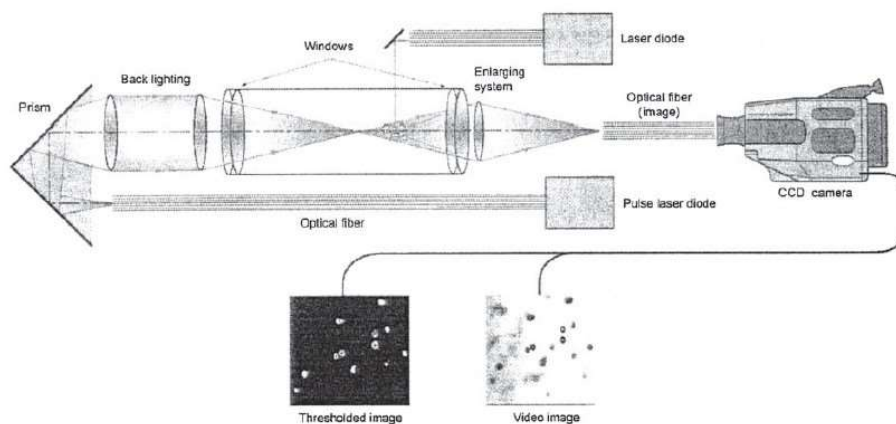
6.1.6 EDF (Francie)

Micro-photography probe je sonda pracující na principu zachycení a analýzy obrazu se zadním podsvícením (metoda „shadowgraphy“ popsána v kapitole 5.1.1.1). Sonda využívá pulzního laserového ozáření (obrázek 41). Laserem lze dosáhnout více pulzů během velmi krátkého časového úseku. Při použití laseru však bylo zjištěno, že přímé laserové světlo je pro určování velikosti částic nevhodné, protože je koherentní, a to vede ke vzniku interferenčních obrazců. Na výsledném obraze pak vznikají světelné skvrny, což ztěžuje analýzu obrazu. [7, 20]

Při vyhodnocení velikosti a rychlosti kapek z kamery je obraz vedený do výpočetního zařízení, kde probíhá analýza. A. Kleitz [20] uvádí tři kroky které vedou k určení velikosti kapek:

1. Stanovení podmínky, která transformuje číselný obraz na binární obraz.

2. Stanovení kritéria rozmazání, které vylučuje kapky, jež jsou příliš daleko od roviny zaostření.
3. Určení velikosti každé kapky.

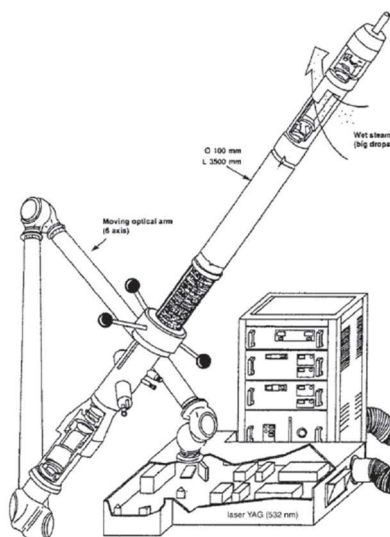


Obrázek 41: Micro-video sonda s použitím pulzního laseru vyvinuta EDF [20]

Holography probe (viz obrázek 42) je sonda na principu holografie (kapitola 5.1.2) vytvořená i přes následující problémy spojené s jejím vývojem:

1. pomalé snímání obrazů,
2. omezené rozměry sondy.

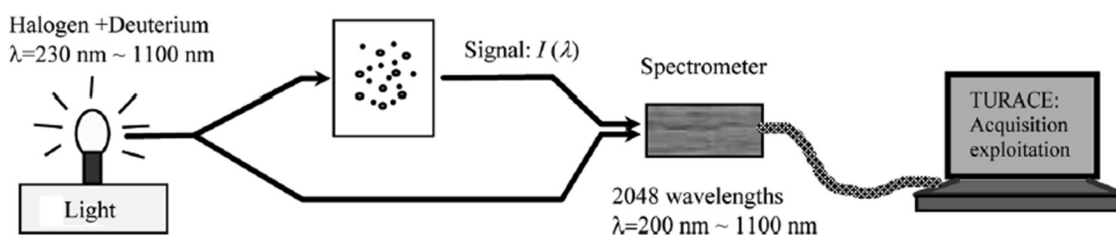
Cílem sondy bylo měřit sekundární kapky způsobující erozi v kondenzátoru jaderné elektrárny. Výsledky měření ukázaly velké kapky o průměru několik mikrometrů, které způsobovaly erozi. Pro tuto sondu nebyly nalezeny žádné další detaily o geometrii sondy, použitých přístrojích, anebo rozsahu použití. [20]



Obrázek 42: Holografická sonda [20]

Turbidity measurement systém je vyobrazený na obrázku 43. Tento systém pracující na principech extinkční metody (kapitola 5.2.6) byl vytvořen v roce 2009 spoluprací EDF s laboratoří univerzity ve městě Rouen (laboratoř jménem **CORIA**) a s profesorem Caiem ze Šanghajske univerzity. Jako světelný zdroj systému je použita kombinace halogenové

a deuteriové lampy zajišťující spektrum vlnových délek od 230 do 1100 nm. Signál zachycený spektrometrem je zaznamenáván pomocí softwaru TURACE, který umožňuje časové snímání s frekvencí 1000 Hz. [59]

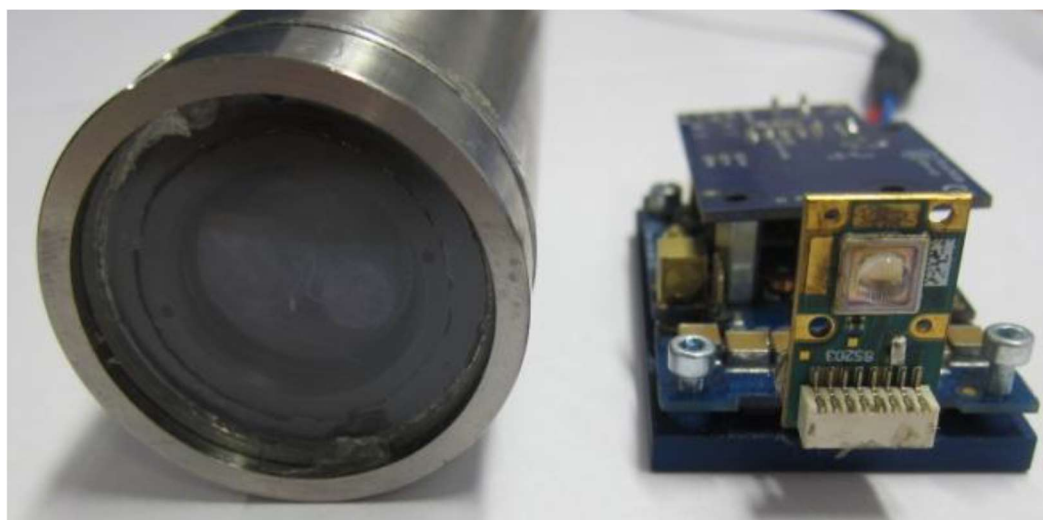


Obrázek 43: Systém extinkčního měření (CORIA, EDF, Cai) [59]

6.1.7 Anglie (Alstom Power Ltd, University of Nottingham)

Na univerzitě v Nottinghamu se návrhu sondy pro parní turbíny věnoval Kris Vernon z firmy Alstom Power. Vernon se ve své disertační práci [16] věnoval návrhu sondy na principu fotografické metody s využitím pulzního LED osvětlení.

Pulsed LED photography probe, vyfocená na obrázku 44, se skládá z malé kamery a objektivu umístěných uvnitř trubky z nerezové oceli o vnějším průměru 50 mm. Sonda nedisponuje vlastním osvětlením, ale při testování v laboratorních podmínkách bylo využito zadního ozáření (kapitola 5.1.1.1) s pulzujícími LED (kapitola 5.1.1.5). Kruhové polykarbonátové okénko chrání přední optickou plochu objektivu před prouděním a utěsňuje vnitřek trubice. Hlavici sondy jsou vedeny kanály, kterými je veden stlačený vzduch, který zabraňuje ulpívání kapek na skle. Sklo má navíc na povrchu hydrofobní povlak. Použitá kamera je Basler ACA2000-gm disponující monochromatickým snímačem s rozlišením 2048 x 1088 pixelů. Velikost jednoho pixelu odpovídá čtverci se stranou dlouhou 5,5 μm. Sonda byla otestována pouze v laboratorních podmínkách a žádná literatura popisující její test na parní turbíně nebyla nalezena. Testování sondy a vyhodnocovacího programu proběhlo pomocí porovnání výsledků s metodou PDPA. Odchyly průměrných hodnot měřených veličin jsou 10-15 %. [60]

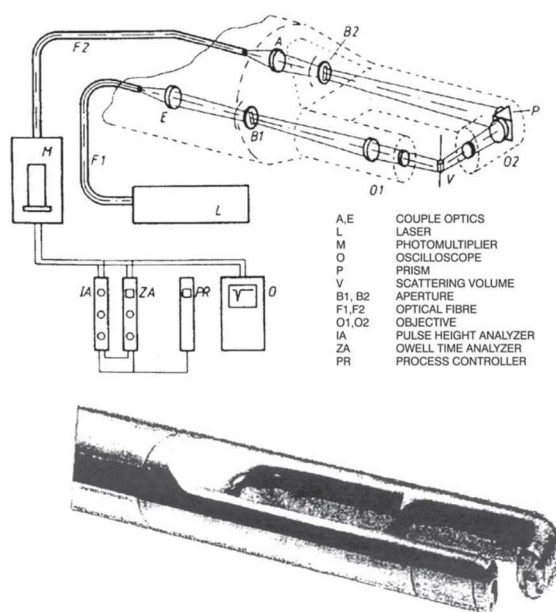


Obrázek 44: Fotografická sonda s pulzním LED osvětlením [60]

6.1.8 IKDG na univerzitě RWTH Aachen

Výzkumníci Ederhof a Dibelius z Institutu elektráren, parních a plynových turbín (IKDG z německého „Institut für Kraftwerkstechnik, Dampf- und Gasturbinen“) univerzity RWTH Aachen první vyvinuli sondu na principu „light-scattering“. Sondu zmiňuje Kleitz [20], ale žádná literatura popisující detaily o sondě nebyla nalezena.

Light scattering probe je vyobrazena na obrázku 45. Popis metody, která je sondou využívána, je uveden v kapitole 5.2.5.2 Sonda byla otestována na aerosolech, které se nachází na výstupu chladicích zařízení, a rozsah velikostí naměřených částic se pohyboval od 1 do 100 μm . Při měření v parní turbíně se kvůli nepříznivým podmínkám uvnitř turbíny nepodařilo dosáhnout přesvědčivých výsledků. Podmínky uvnitř PT se od testů na aerosolech lišily hlavně v množství, v rychlostech a ve velikostech kapek. [20]

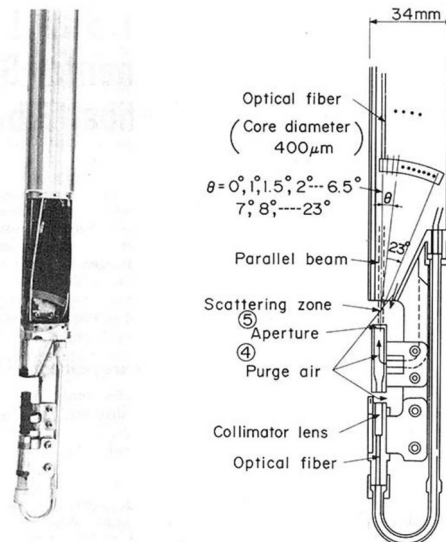


Obrázek 45: Sonda na principu side-scattering (IKDG z RWTH Aachen) [20]

6.1.9 Toshiba Corporation Japonsko

Výzkumní pracovníci Tatsuno a Nagao z japonské firmy Toshiba vyvinuli sondu na principu „forward scattering“, která využívá vedení záření pomocí optických vláken mimo sondu. Převod na elektrický signál probíhá až mimo hlavici sondy.

Forward scattering probe je založená na vedení helium-neonového laseru ($\lambda = 633 \text{ nm}$) skrze optické vlákno do pozorovaného prostoru, kde probíhá rozptyl světla vlivem přítomných částic kapalné fáze. Rozptýlené světlo je dále zachyceno 30 optickými vlákny umístěnými ve směru původního záření. Úhel pozorování je tedy na 30 místech a nabývá hodnot od 0° do 23° . Optická vlákna odvádí rozptýlené záření mimo sondu do fotodetektorů, kde je intenzita záření transformována na elektrický signál určený pro zpracování výpočetním zařízením. Metoda použitá pro tuto sondu je popsána v kapitole 5.2.5.3. Schéma sondy a její fotografie se nachází na obrázku 46. [40]

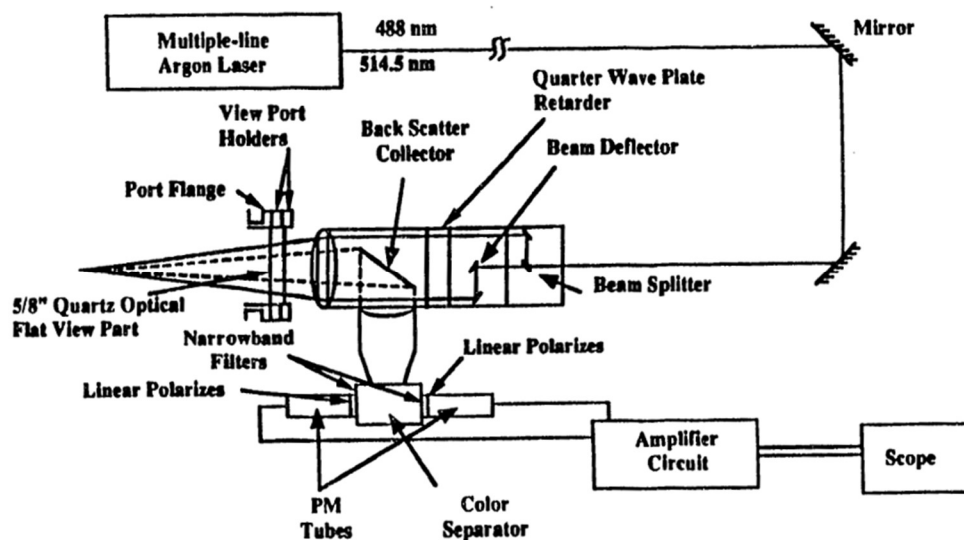


Obrázek 46: Sonda firmy Toshiba fungující na principu forward scattering [40]

Sonda byla testována v laboratorních podmínkách, kde se podařilo zachytit částice polystyrenu v rozsahu velikostí od 0,1 do 5,7 μm . Na experimentální turbíně 10 MW byly provedeny testy, u kterých se podařilo vyhodnotit vlhkost i rozptyl velikostí částic (naměřené částice spadaly do intervalu 0,1 až 1 μm). [40]

6.1.10 Oak Ridge National Laboratory

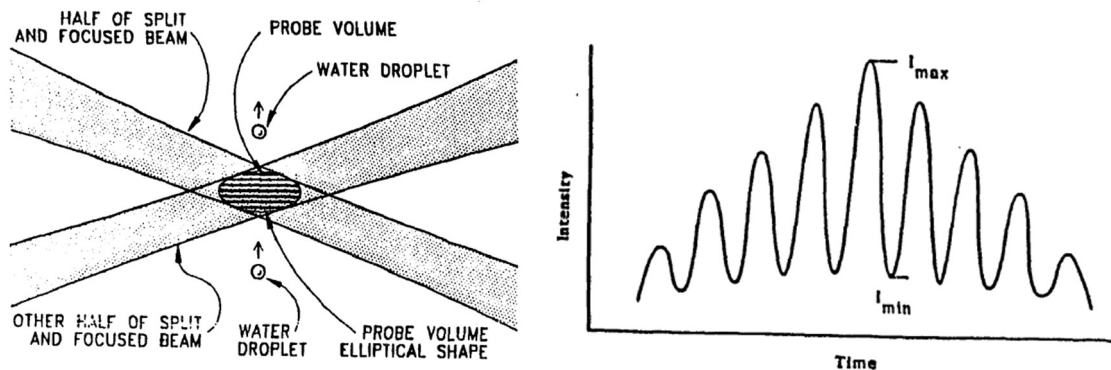
Back-scatter sonda pro měření primárních kapek je schematicky zobrazena na obrázku 47. Metoda funguje na principech metody „Phase doppler particle analysis“, konkrétně na metodě time shift technique (viz kapitola 5.2.4). Název „back-scatter“ je uveden autory z důvodu konstrukce sondy, protože je pozorováno záření rozptýlené směrem ke zdroji záření.



Obrázek 47: Schéma sondy na principu phase doppler technique [36]

Zdrojem záření sondy byl polarizovaný Argon-iontový laser ($\lambda = 488/514 \text{ nm}$). Záření bylo rozděleno na dvě složky stejných intenzitách, které se opět střetávali v pozorovaném objemu a vytvářeli interferenční obrazec (obrázek 48 – nalevo). Při průchodu kapky obrazem

docházelo k pulzujícímu rozptylu světla, jak kapka procházela postupně oblastmi nízké a vysoké intenzity ozáření. Rozptýlené záření bylo zachyceno a signál (obrázek 48 – napravo) byl analyzován pomocí teorie Mie. Sonda byla otestována v laboratoři pomocí latexových kuliček i na NT dílu parní turbíny s přesvědčivými výsledky pro kapky od 0,9 do 3,6 μm . [36]



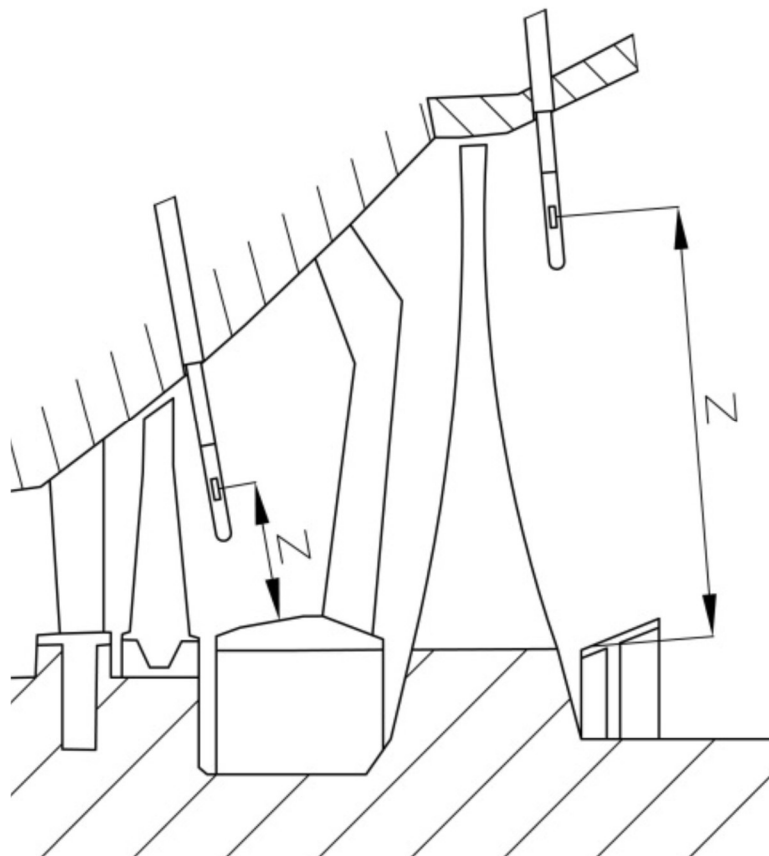
Obrázek 48: Interferenční obrazec (nalevo) a signál (napravo) time shift PDP sondy [36]

6.2 Měření použitím sond

6.2.1 Podmínky pro měření

Všechny sondy jsou před měřením v parních turbínách testovány v laboratorních podmínkách. V laboratorních podmínkách probíhá kalibrace a konfigurace programů pro vyhodnocení zaznamenaných dat. Po testování v laboratorních podmínkách se sonda testuje přímo v parní turbíně. Pro umístění sondy do měřících poloh v PT se používají vodící trubky. Hlavice sondy je nasazena na vodící trubce, vnitřkem této trubky jsou vedeny potřebné kabely pro přenos informací (popřípadě optické kabely anebo natlakovaný vzduch pro udržování čisté pozorovací plochy). Délka vodící trubky závisí na geometrii turbíny a části turbíny, kde má měření probíhat.

Nejjednodušší možností pro toto měření jsou experimentální turbíny ve výzkumných centrech. Obtížnější možností může být měření na elektrárně, které vyžaduje, aby byla turbína vybavena otvory pro měření ve správných místech a o poloměrech odpovídající poloměru vodící tyče sondy. Některé PT mají otvory určené pro pneumatické sondy. Někdy se velikosti těchto otvorů se pohybují mezi 8 a 15 mm v tomto případě je lze využít jen pro velmi malé sondy. Často je možné se setkat se otvory o průměrech 30 mm nebo i 50 mm. Při měření na PT je nutné brát v potaz nepříznivé podmínky jako vysoká teplota a tlak. Hlavně nesmí dojít ke kontaktu mezi sondou a rotorem. Tlak proudu vyvinutý proudem páry na sondu není velký, ale může dojít k ohnutí sondy vlivem kmitání. Nákres měření sondami před rozváděcími lopatkami a za oběžnými lopatkami posledního stupně je na obrázku 49.



Obrázek 49: Příklad poloh pro měření na NT dílu PT [57]

6.2.2 Pracoviště používající experimentální metody

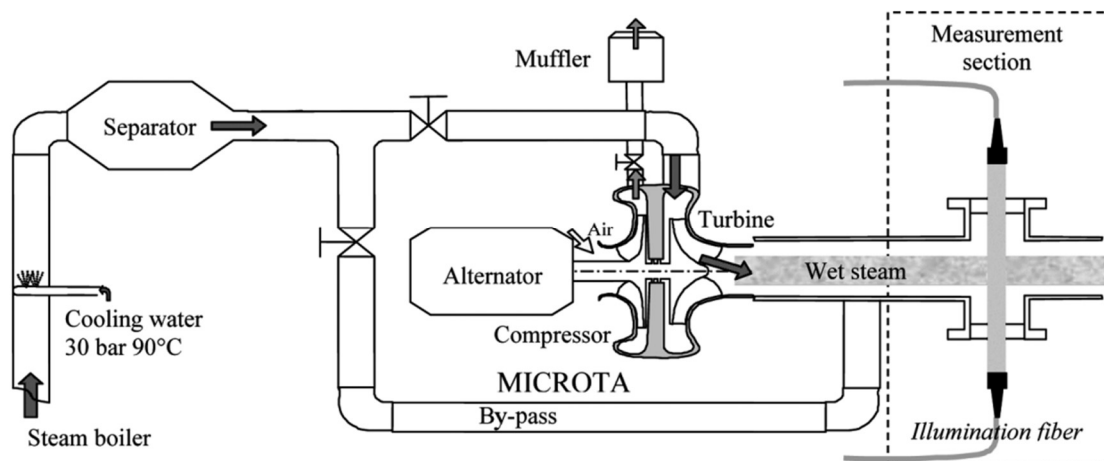
V současné době není mnoho pracovišť, které by publikovali svoje výsledky z měření na parních turbínách. Některé výzkumné týmy se tomuto měření věnovaly, ale změnili svoje zaměření anebo časem ztratili potřebné know-how. V následujících kapitolách jsou vypsány pracoviště, které v nedávné době publikovali výsledky měření vlhkosti optickými sondami v parní turbíně.

6.2.2.1 Ústav energetiky na ČVUT

Měření výzkumnými pracovníky Ústavu energetiky fakulty strojní na ČVUT probíhá primárně na elektrárnách po území ČR. Mezi elektrárny, na kterých bylo úspěšně měřeno patří například uhelné elektrárny Počerady, Prunéřov nebo jaderná elektrárna Temelín. Měření probíhá sondováním skrz plášť turbíny sondami o průměrech 25 mm a často probíhá ve spolupráci s pracovníky z Doosan Škoda Power anebo z institucí jako USST Šanghaj a Ústav termomechaniky Akademie věd ČR. [2, 52, 57]

6.2.2.2 EDF Francie

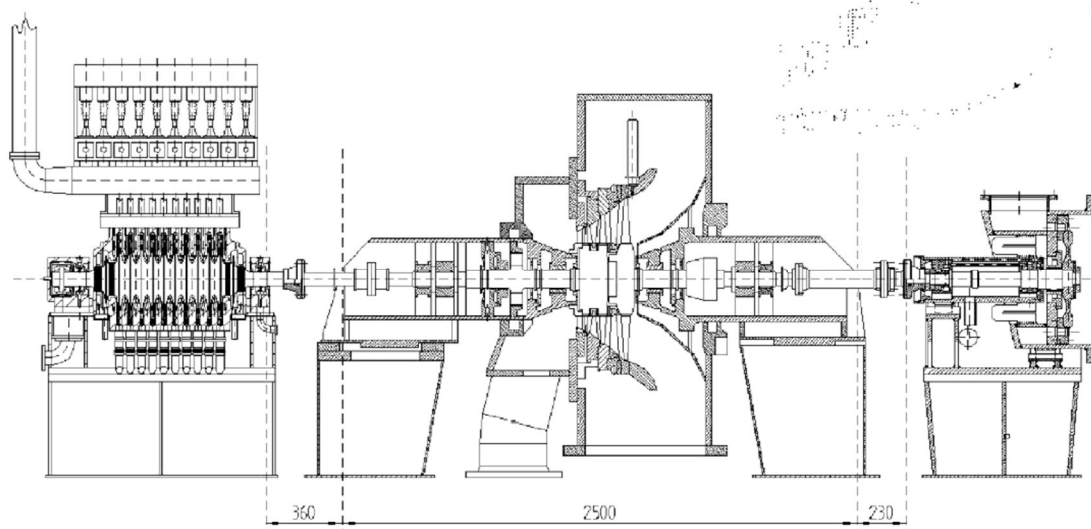
Společnost EDF ve spolupráci s laboratoří CORIA a profesorem Caiem ze Šanghajske USST testovali na experimentálním zařízení extinkční sondu (schéma na obrázku 51). Detailní popis sondy i takzvané experimentální platformy popsal Ren [59]. Zařízení je navrženo tak, aby vyrábělo mokrou páru s velmi dobrou stabilitou. Nastavením vstupní teploty a tlaku turbíny lze ovlivnit množství kapek tak, aby odpovídala vlhkosti, která panuje na výstupu z nízkotlakého válce parních turbín velkých elektráren. Teoretickou vlhkost na měřicím úseku lze odvodit ze vstupních podmínek a účinnosti turbíny.



Obrázek 50: Schéma testovacího zařízení firmy EDF [59]

6.2.2.3 ITSM Stuttgart

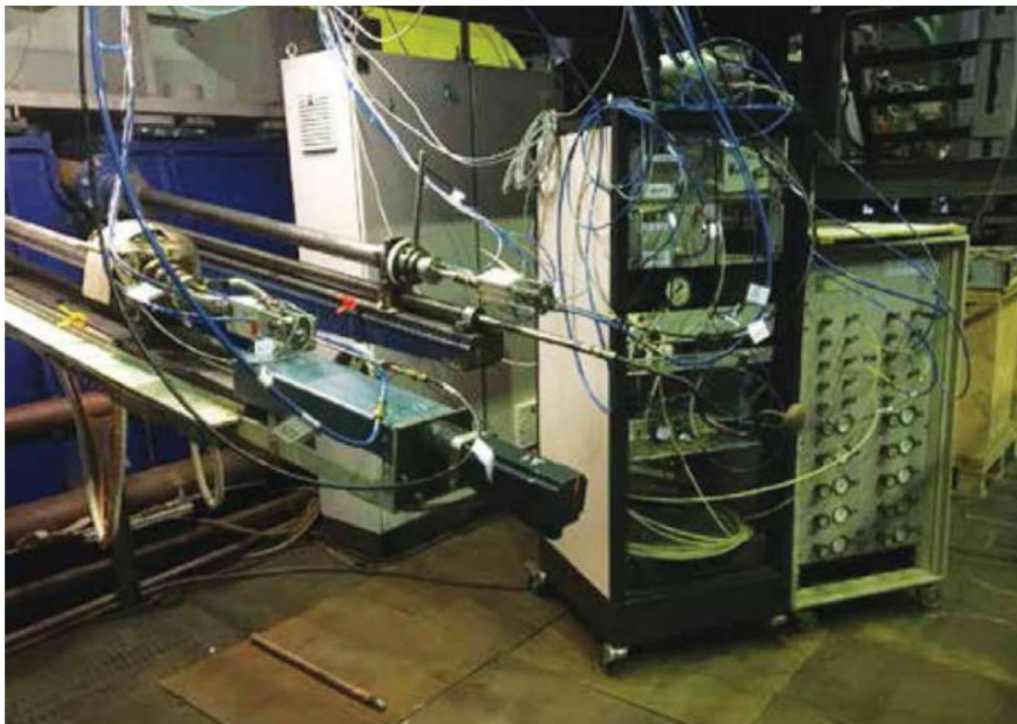
Ústav tepelných turbosoustrojí a strojní laboratoř Univerzity ve Stuttgartu (ITSM) provozuje experimentální třístupňovou PT pro hodnocení a testování lopatek koncových stupňů NT dílu. Řez turbínou je na obrázku 52. Na turbíně byly testovány extinkční sondy vyvinuté ITSM popsané článku od Schatze [50].



Obrázek 51: Řez experimentální turbínou ITSM Stuttgart [50]

6.2.2.4 CKTI v Petrohradu

Výzkumný institut v Petrohradu zabývající se vývojem a výzkumem v oblasti energetiky a turbín disponuje experimentální turbínou. Turbína je upravena na měření sondami, které byly vyvinuty pracovníky ústavu. Fotografie na obrázku 53 zaznamenává sondování na experimentální turbíně. [49]



Obrázek 52: Sondování na experimentální turbíně CKTI [49]

7 Závěr

Negativní vlivy na provoz parní turbíny spojené s vlhkostí jsou v publikované literatuře dobře popsány. Důležitá informace je, že tyto vlivy nelze definovat pouze hodnotou vlhkosti, ale že chování kapalně fáze v proudu parní turbíny je velmi komplikovaná úloha. Kapalná fáze se v PT vyskytuje ve formě kapek unášených proudem a vodních filmů ulpívajících na povrchích průtočné části. Hlavní faktory, které rozhodují o tom, jaký bude mít kapalná fáze vliv na provoz PT jsou velikost kapek, množství kapek, rychlost a směr proudění kapek. Kapky lze rozdělit na jemné a hrubé neboli na primární a sekundární. Primární kapky vznikají při expanzi vodní páry po překročení Wilsonovy linie a dosahují velikostí do 1 μm . Tyto kapky jsou unášeny proudem páry a mají zanedbatelný vliv na erozi lopatek. Jejich nukleace a růst způsobují termodynamickou ztrátu. Někdy dochází kulpívání kapek na povrchy v průtočné části (například povrch rozváděcí lopatky) a vznikají vodní filmy. Vodní filmy se odtrhávají z odtokových hran ve formě větších kapek. Tyto kapky jsou označovány za sekundární (neboli hrubé) a mohou dosahovat velikostí od 1 do 400 μm . Sekundární kapky mají největší vliv na erozi lopatek kvůli jejich nezanedbatelné hmotnosti a vysokým dopadovým rychlostem.

S ohledem na komplexnost této problematiky nelze předpokládat, že používané modely pro výpočty pomocí CFD nebo modely pro předpovídání erozního poškození budou bez experimentálního ověření správné. Proto je od 80. let minulého století velký zájem o výsledky měření z parních turbín, která by zpřesnily tyto modely. Optické sondy přinášejí cestu vedoucí k získání těchto kýžených výsledků.

Na začátku práce je stručný úvod do problematiky. V kapitole 2 je popsána historie zkoumání problematiky vlhkosti uvnitř PT a krátká sekce této kapitoly je věnovaná i historii optických metod. Kapitoly 3 a 4 slouží jako předložení motivace pro zkoumání vlhkosti. Kapitola 3 se soustředí na R-C cyklus a na roli vlhkosti při zvyšování účinnosti carnotizací. V kapitole 4 jsou uvedeny detaily o kapalně fázi. Konkrétně je uveden její vznik, vliv na erozi lopatek a ztráty, které způsobuje.

Na základě výzkumu dostupné literatury byla shromážděna data ohledně metod použitelných pro určování parametrů kapalně fáze optickými metodami. Práce cílila hlavně na metody schopné určit rozložení velikostí kapek. Základní principy, výhody a nevýhody jednotlivých metod byly popsány v kapitolách 5.1 a 5.2. V kapitole 5.3 pak bylo provedeno porovnání metod pro měření primárních a pro měření sekundárních kapek. Pro měření primárních kapek se zdá být nejvhodnější metodou extinkční metoda. Měření sekundárních kapek je možné realizovat mnoha metodami, ale metody na principu zaznamenání obrazu mají nejvíce výhod. Další relevantní metodou je „Light fluctuation“, která je schopná měřit primární i sekundární kapky, její nevýhoda je hlavně menší oblast použití při měření sekundárních kapek. Metodou, která přemostňuje oblast měření na pomezí primárních a sekundárních kapek, je metoda s názvem „Phase doppler particle analysis“. Její rozsah využití pro měření v PT je malý, ale kombinací této metody s metodami „extinction“ a „photography“ by bylo možné získat hodnoty pro kapky všech velikostí.

V kapitole 6.1 byly popsány jednotlivé sondy vyvinuté pracovišti zabývajícími se zkoumáním kapalně fáze v PT. V kapitole 6.2 pak bylo popsáno samotné měření pomocí sond a také pracoviště, která používají sondy pro měření na experimentálních PT anebo PT v provozu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] MOORE, M. J. a C. H. SIEVERDING. *Two-phase steam flow in turbines and separators: theory, instrumentation, engineering*. 1976.
- [2] KOLOVRATNÍK, Michal. *Vznik a vývoj kapalně fáze v parních turbínách*. V Praze: České vysoké učení technické, 2005. ISBN 978-80-01-03225-1.
- [3] KOLOVRATNÍK, Michal a Václav PETR. Diagnostika vývoje kapalně fáze v průtočné části parní turbíny. In: *Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách* [online]. 2009. Dostupné z: http://old.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/clanek_2_kolovratnik.pdf
- [4] *Steam turbine* [online]. 2023 [vid. 2023-05-17]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Steam_turbine&oldid=1154876474
- [5] KNIGHT, Edward Henry. *Knight's American mechanical dictionary: a description of tools, instruments, machines, processes, and engineering, history of inventions, general technological vocabulary, and digest of mechanical appliances in science and the arts* [online]. Boston: Houghton, Mifflin, 1876 [vid. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://catalog.hathitrust.org/Record/005762472>
- [6] GYARMATHY, Georg. *Grundlagen einer Theorie der Nassdampfturbine* [online]. B.m., 1962 [vid. 2023-04-28]. ETH Zurich. Dostupné z: doi:10.3929/ETHZ-A-000087803
- [7] VERNON, Kris. A photographic probe for wet steam. 2014.
- [8] CHAPLIN, R A. Steam Turbine Operational Aspects. *THERMAL POWER PLANTS*. nedatováno.
- [9] PETR, Vaclav. Nekrolog Ing. Jana Valhy, DrSc. *Česká společnost pro mechaniku - Bulletin 1/09*. nedatováno, **2009**(1).
- [10] BARTOŠ, Ondřej, Xiaoshu CAI a Michal KOLOVRATNÍK. A detection of the coarse water droplets in steam turbines. *EPJ Web of Conferences* [online]. 2014, **67**, 02005. ISSN 2100-014X. Dostupné z: doi:10.1051/epjconf/20146702005
- [11] *Carnotův cyklus* [online]. 2023 [vid. 2023-05-27]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Carnot%C5%AFv_cyklus&oldid=22514078
- [12] HOZNEDL, Michal a Jan BIELKO. Waste to Energy steam turbine wet steam flow and LP exhaust cooling. In: *Steam Turbine and Generator user group*. Manchester. duben 2023.
- [13] BAUMANN, K. Some recent developments in large steam turbine practice. *Journal of the institution of electrical engineers*. 1921, **59**(302), 565–623.
- [14] PETR, Václav a Michal KOLOVRATNÍK. Wet steam energy loss and related Baumann rule in low pressure steam turbines [online]. nedatováno, **2013**. Dostupné z: doi:10.1177/0957650913512314

- [15] KOLOVRATNÍK, Michal a Václav PETR. *Vliv kapalně fáze hrubé disperze na energetické ztráty vlhkostní páry a erozi lopatek NT dílu parní turbíny (část I. + část II.)*. 2022.
- [16] HOZNEDL, Michal, Michal KOLOVRATNIK a Jun GUKCHOL. Calculation of thermodynamic wetness loss in steam turbines using CFD simulation. In: *Turbomachinery Technical Conference and Exposition: Proceedings of ASME Turbo Expo 2023*. Boston, Massachusetts: ASME, in press.
- [17] VLASÁK, Jakub a Zdeněk RUMML. Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách. In: *Životnost komponent energetických zařízení: Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*. nedatováno, s. 51–56.
- [18] VLASÁK, Jakub. *Material challenges of steam turbine blades operated in wet steam region - part 2* [online]. B.m.: University of West Bohemia, 2019 [vid. 2023-05-17]. ISBN 978-80-261-0879-5. Dostupné z: <http://dspace5.zcu.cz/handle/11025/35241>
- [19] VLASÁK, Jakub a Zdeněk RUMML. *Vliv erozního poškození na životnost nízkotlakých lopatek s použitím různých erozních ochranných prostředků* [online]. B.m.: Západočeská univerzita v Plzni, 2021 [vid. 2023-05-17]. ISBN 978-80-261-1045-3. Dostupné z: <http://dspace5.zcu.cz/handle/11025/50692>
- [20] KLEITZ, A a J M DOREY. Instrumentation for wet steam. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* [online]. 2004, **218**(8), 811–842. ISSN 0954-4062, 2041-2983. Dostupné z: doi:10.1243/0954406041474192
- [21] TAYALI, N.E. a C.J. BATES. Particle sizing techniques in multiphase flows: A review. *Flow Measurement and Instrumentation* [online]. 1990, **1**(2), 77–105. ISSN 09555986. Dostupné z: doi:10.1016/0955-5986(90)90032-3
- [22] BOKUCHAVA, N I a F M INOCHKIN. Measurement of high-speed gas-droplet flow characteristics by pulse photography method. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2019, **1421**(1), 012035. ISSN 1742-6588, 1742-6596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1421/1/012035
- [23] DynamicStudio Shadow Sizing | Size, Shape & Velocity Analysis. *Dantec Dynamics | Precision Measurement Systems & Sensors* [online]. [vid. 2023-05-29]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/solutions/spray-and-particle/shadow-sizing/>
- [24] *VisiSize N60 - Spray Characterisation Tool* | Oxford Lasers [online]. [vid. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://www.oxfordlasers.com/laser-imaging/visisize-n60>
- [25] AZZOPARDI, B.J. Measurement of drop sizes. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 1979, **22**(9), 1245–1279. ISSN 00179310. Dostupné z: doi:10.1016/0017-9310(79)90215-1
- [26] HULST, H. C. van de. *Light Scattering by Small Particles*. B.m.: Dover Publications, 2012. ISBN 978-1-306-35172-0.

- [27] BARNHART, Samuel a Sidaard GUNASEKARAN. *Design and Development of a Coherent Detection Rayleigh Doppler Lidar System for Use as an Alternative Velocimetry Technique in Wind Tunnels* [online]. B.m., 2020. PhD Thesis. b.n. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.32670.15688
- [28] MIE, Gustav. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Annalen der Physik* [online]. 1908, **330**(3), 377–445. ISSN 00033804, 15213889. Dostupné z: doi:10.1002/andp.19083300302
- [29] SAKAMOTO, T. Investigation of Wet Steam Flow for Steam Turbine Repowering. *ASME Paper, PWR*. 1992, **18**, 33.
- [30] DEHAECK, S. a Jeroen BEECK. Designing a maximum precision interferometric particle imaging set-up. *Experiments in Fluids* [online]. 2007, **42**(5), 767–781. ISSN 0723-4864, 1432-1114. Dostupné z: doi:10.1007/s00348-007-0286-2
- [31] DEHAECK, Sam, Jeroen van BEECK a Michel Léon RIETHMULLER. Glare point velocimetry and sizing (GPVS): introduction of a new optical 2D measuring technique for bubbly flows. In: . 2004.
- [32] DEHAECK, Sam a Jeroen BEECK. Demonstration and characterisation of a new interferometric particle imaging configuration for bubbles. 2006, 26–29.
- [33] JASIKOVA, Darina, Michal KOTEK, Tadeáš LENC a Václav KOPECKÝ. The study of full cone spray using interferometric particle imaging method. *EPJ Web of Conferences* [online]. 2012, **25**, 01033-. Dostupné z: doi:10.1051/epjconf/20122501033
- [34] Measurement Principles of PDA - Dantec Dynamics. *Dantec Dynamics | Precision Measurement Systems & Sensors* [online]. [vid. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/solutions/spray-and-particle/phase-doppler-anemometry-pda/measurement-principles-of-pda/>
- [35] ALBRECHT, H.E., N. DAMASCHKE, M. BORYS a C. TROPEA. *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques* [online]. B.m.: Springer Berlin Heidelberg, 2013. Experimental Fluid Mechanics. ISBN 978-3-662-05165-8. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=49TqCAAQBAJ>
- [36] KERCEL, SW, ML SIMPSON, M AZAR a M YOUNG. *An optical technique for characterizing the liquid phase of steam at the exhaust of an LP turbine*. B.m.: Oak Ridge National Lab., TN (United States). 1993.
- [37] *Physics Tutorial: Polarization* [online]. [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.physicsclassroom.com/Class/light/U12L1e.cfm#scat>
- [38] TAYALI, N.E. a C.J. BATES. Particle sizing techniques in multiphase flows: A review. *Flow Measurement and Instrumentation* [online]. 1990, **1**(2), 77–105. ISSN 09555986. Dostupné z: doi:10.1016/0955-5986(90)90032-3
- [39] BOSDAS, Ilias, Michel MANSOUR, Anestis I. KALFAS a Reza S. ABHARI. An optical backscatter probe for time resolved droplet measurements in turbomachines.

- Measurement Science and Technology* [online]. 2016, **27**(1), 015204. ISSN 0957-0233. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/27/1/015204
- [40] TATSUNO, K. a S. NAGAO. Water Droplet Size Measurements in an Experimental Steam Turbine Using an Optical Fiber Droplet Sizer. *Journal of Heat Transfer* [online]. 1986, **108**(4), 939–945. ISSN 0022-1481. Dostupné z: doi:10.1115/1.3247038
- [41] BOSDAS, Ilias, Michel MANSOUR, Anestis I KALFAS a Reza S ABHARI. A miniature optical extinction heated probe for fog droplet measurements in steam turbines. In: *E3S Web of Conferences*. B.m.: EDP Sciences, 2022, s. 01001.
- [42] FELDBERG, L. A. Interní prezentace extinkční sondy CKTI. In: . Petrohrad. 2017.
- [43] CAI, Xiaoshu, Lili WANG, Yongzhi PAN, Xin OUYAN a Jianqi SHEN. A novel method for measuring the coarse water droplets in wet steam flow in steam turbines. *Journal of Thermal Science* [online]. 2001, **10**(2), 123–126. ISSN 1003-2169, 1993-033X. Dostupné z: doi:10.1007/s11630-001-0052-3
- [44] BAREISS, Stefan, Benjamin BORK, Saša BAKIĆ, Cameron TROPEA, Robert IRSIG, Josef TIGGESBÄUMKER a Andreas DREIZLER. Application of femtosecond lasers to the polarization ratio technique for droplet sizing. *Measurement Science and Technology* [online]. 2013, **24**(2), 025203. ISSN 0957-0233, 1361-6501. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/24/2/025203
- [45] EDERHOF, A a G DIBELIUS. Determination of Droplet Size and Wetness Fraction in Two-Phase-Flows Using a light scattering Technique. In: *Sixth Thermodynamics and Fluid Mechanics convention, I. Mech. E. C.* 1976.
- [46] WALTERS, P. T. Practical applications of inverting spectral turbidity data to provide aerosol size distributions. *Appl. Opt.* [online]. 1980, **19**(14), 2353–2365. Dostupné z: doi:10.1364/AO.19.002353
- [47] KANTOLA, R. A. *Condensation in steam turbines. Final report* [online]. EPRI-CS-2528. B.m.: General Electric Co., Schenectady, NY (USA). Corporate Research and Development Dept. 1982 [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/biblio/6872892>
- [48] YOUNG, J. B., K. K. YAU a P. T. WALTERS. Fog Droplet Deposition and Coarse Water Formation in Low-Pressure Steam Turbines: A Combined Experimental and Theoretical Analysis. *Journal of Turbomachinery* [online]. 1988, **110**(2), 163–172. ISSN 0889-504X, 1528-8900. Dostupné z: doi:10.1115/1.3262176
- [49] KHOMENOK, L. A., L. A. FELDBERG, N. Yu. BOKUCHAVA, A. A. IVANOVSKY, S. N. KOZACHUK a A. M. TYUKHTYAEV. Study of wet-steam flow in the last stage of the LPC of an experimental steam turbine. *Safety and Reliability of Power Industry* [online]. 2022, **15**(3), 175–182. ISSN 2542-2057, 1999-5555. Dostupné z: doi:10.24223/1999-5555-2022-15-3-175-182
- [50] SCHATZ, M. a M. CASEY. Design and testing of a new miniature combined optical/pneumatic wedge probe for the measurement of steam wetness. In: *MULTIPHASE FLOW: THE ULTIMATE MEASUREMENT CHALLENGE: Proc. of The 5th Int. Symp. on*

- Measurement Techniques for Multiphase Flows (5th ISMTMF); 2nd Int. Wrkshp.on Process Tomography (IWPT-2) (As a part of ISMTMF); 5th ISMTMF/IWPT-2, 2006-Macau/Zhuhai): AIP Conference Proceedings* [online]. Macau (China): AIP, 2007, s. 464–479 [vid. 2023-05-23]. ISSN 0094243X. Dostupné z: doi:10.1063/1.2747469
- [51] FAN, Xueliang, Zhihai JIA, Jingjing ZHANG a Xiaoshu CAI. A video probe measurement system for coarse water droplets in LP steam turbine. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2009, **147**, 012065. ISSN 1742-6596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/147/1/012065
- [52] CAI, Xiaoshu, Deliang NING, Jiangfeng YU, Junfeng LI, Li MA, Chang TIAN a Wei GAO. Coarse water in low-pressure steam turbines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* [online]. 2014, **228**(2), 153–167. ISSN 0957-6509, 2041-2967. Dostupné z: doi:10.1177/0957650913518767
- [53] BOSDAS, Ilias, Michel MANSOUR, Anestis KALFAS, Reza ABHARI a Shigeki SENOO. Unsteady wet steam flow field and droplet measurements at the last stage of low-pressure steam turbine. In: . 2015.
- [54] WANG, Nai-ning. *Näsemessungen in Niederdruckturbinen mit Lichtsonden*. B.m., 1982. PhD Thesis. Verlag nicht ermittelbar.
- [55] RENNER, Martin. *Entwicklung eines optisch-pneumatischen Meßsystems für Zweiphasen-Wasserdampfströmungen*. B.m.: na, 2001.
- [56] SEIBOLD, Andreas. *Entwicklung einer hoch auflösenden Sonde zur simultanen Erfassung von Kondensations-und Strömungsvorgängen in Niederdruck-Dampftrubinen*. B.m.: VDI Fortschritt-Bericht (Dissertation), 2000.
- [57] KOLOVRATNÍK, Michal a Ondřej BARTOŠ. Experimental investigation of the steam wetness in a 1000 MW steam turbine. *EPJ Web of Conferences* [online]. 2016, **114**, 02056. ISSN 2100-014X. Dostupné z: doi:10.1051/epjconf/201611402056
- [58] NEDOMA, Marek. *Návrh sondy pro měření hrubé vodní disperze v parních turbínách*. B.m., 2019. ČVUT v Praze.
- [59] REN, Kuanfang, Feng XU, Xiaoshu CAI a Jean-Marc DOREY. DEVELOPMENT OF A PRECISE AND IN SITU TURBIDITY MEASUREMENT SYSTEM. *Chemical Engineering Communications* [online]. 2009, **197**(2), 250–259. ISSN 0098-6445, 1563-5201. Dostupné z: doi:10.1080/00986440902938865
- [60] VERNON, Kris, David HANN a Tim RICE. Pulsed LED Photography for Coarse Water Characterisation. In: *ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition: Volume 1B: Marine; Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines* [online]. Düsseldorf, Germany: American Society of Mechanical Engineers, 2014, s. V01BT27A010 [vid. 2023-05-25]. ISBN 978-0-7918-4558-5. Dostupné z: doi:10.1115/GT2014-25401

