

Vrije-Elektronen-Laser werk aan de Universiteit van Twente in samenwerking met het Nederlands Centrum voor Laser Research.

J.W.J. Verschuur^a, B.M. van Oerle^b, D. Bisero^b, G.J. Ernst^a, P.J.M. van der Slot^b, P. Zambon^a, J. Wiland^a, J.I.M. Botman^c, H.L. Hagedoorn^c en W.J. Witteman^{a,b}.

^a Universiteit Twente, Postbus 217, 7500 AE Enschede.

^b Nederlands Centrum voor Laser Research, Postbus 2662, 7500 CR Enschede.

^c Technische Universiteit Eindhoven, Postbus 513, 5600 MB Eindhoven.

Inleiding

In de vakgroep Quantum Elektronica van de Faculteit Technische Natuurkunde aan de Universiteit Twente zijn momenteel drie Vrije-Elektronen-Laser projecten operationeel. De projecten worden uitgevoerd in nauwe samenwerking met het Nederlands Centrum voor Laser Research. In Tabel 1 staan een aantal karakteristieke eigenschappen van de systemen samengevat.

Het FEL-onderzoek binnen de vakgroep richt zich met name op de fysische aspecten

Tabel 1 Vrije-Elektronen-Lasers bij Quantum Elektronica (UT)

type FEL	e-energie [keV]	stroom [A]	golflengte [μm]	undulator	pulse duur [μs]
Raman	500	500	10000	helische-em	30
Compton I	3000-7000	350	200-600	hybride-pm	0.02-0.06
Compton II	25000	100	10	hybride-pm	0.02-0.06
Cerenkov	200-500	100	700-6000	dielectricum	1000

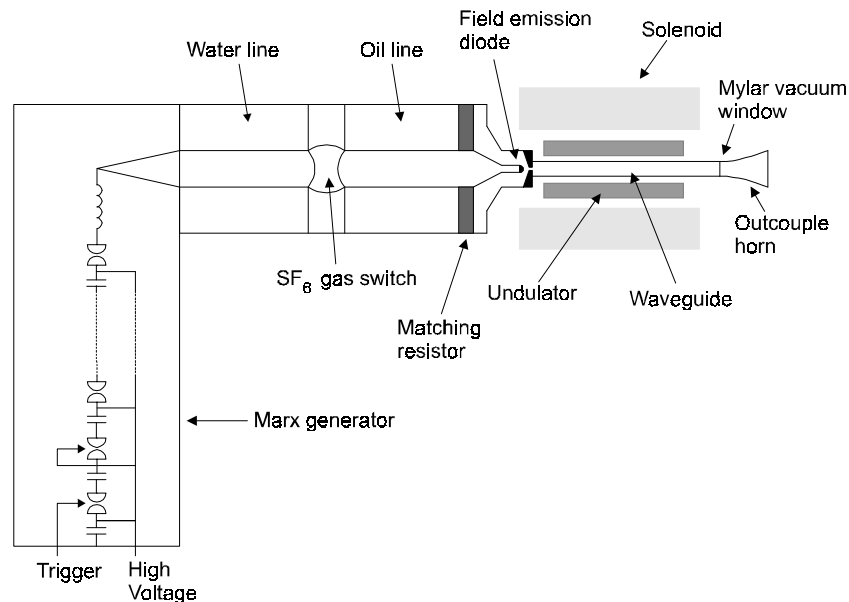
van het FEL-mechanisme en de technologische ontwikkeling van componenten voor een effectieve productie van straling. Ook wordt veel aandacht besteed aan de ontwikkeling van diagnostiek, zowel voor de elektronenbundel als voor de optische bundel. Veel componenten zijn in huis ontwikkeld en gebouwd. Op deze wijze wordt getracht FEL's aantrekkelijk te maken voor industriële toepassingen. Dit laatste aspect krijgt met name veel aandacht in de samenwerking met het NCLR.

Hieronder volgt een korte beschrijving van de verschillende projecten.

Raman FEL

De Raman vrije-elektronenlaser (RFEL), ontwikkelt door NCLR in samenwerking met de vakgroep Quantum Elektronica van de Universiteit Twente, is de eerste vrije-elektronenlaser in Nederland die operationeel werd. De eerste laserwerking is in de zomer van 1990 waargenomen. Het systeem wordt voornamelijk gebruikt voor het bestuderen van de fysica van de FEL bij hoge stroomdichtheden en lage energie. Zie Figuur 1 voor een schematische weergave van de laser. Zoals in een Compton vrije-elektronenlaser (CFEL) wordt ook in een RFEL een relativistisch elektronenbundel door een undulator gestuurd. De RFEL onderscheidt zich van de CFEL door de in verhouding hoge stroom en lage energie van de elektronenbundel. Dat houdt in dat de Coulomb krach-

ten tussen de elektronen vergelijkbaar of zelfs groter zijn dan de door de undulator en stralingsveld op de elektronen uitgeoefende krachten. Derhalve kunnen de Coulomb interacties niet verwaarloosd worden zoals gebruikelijk is in een beschrijving van de CFEL. Door de hoge elektronendichtheid kunnen gemakkelijk plasmagolven opgewekt worden in de bundel waarvan de dichtheidsvariaties het bunching proces van de vrije-elektronenlaser kunnen beïnvloeden. De plasmagolven kunnen in twee groepen worden verdeeld, de zogenaamde positieve en negatieve energie golven. Bij de eerste neemt de



Figuur 1 Een schematische weergave van de Raman Vrije-Elektronen-Laser.

amplitude van de golven (dichtheidsmodulatie) af als de golf energie verliest terwijl bij de tweede de amplitude juist toeneemt als de golf energie verliest. Het is de negatieve energie plasmagolf die koppelt met het FEL proces. Derhalve is de laserwerking in een RFEL een drie-golf proces. Immers gezien in het ruststelsel van de elektronen nemen een pseudo electromagnetisch veld (het Doppler verschoven magneetveld van de undulator), het stralingsveld en de plasmagolven deel aan het interactie proces waarbij aan bepaalde faserelaties tussen de golven moet worden voldaan analoog aan Raman verstrooiing. Vandaar de naam Raman vrije-elektronen-laser. Vooral door de aanwezigheid van de negatieve energie plasmagolf vertoont de RFEL in het algemeen een hoge gain, immers de plasmagolf versterkt het bunching proces als de elektronen energie verliezen. Vanwege de Coulombkrachten en relatief lage energie van de elektronen is het in het algemeen ook noodzakelijk om een extern axiaal magneetveld aan te leggen om de elektronen door de golfpijp te kunnen transporten. Dit magneetveld heeft een grote invloed op de elektronendynamica en dus ook op de laserwerking. Ten eerste is het slechts mogelijk om een helisch undulatorveld te gebruiken voor stabiele propagatie van de elektronen. Verder is er voor een bepaalde combinatie van axiaal- en undulatormagneetveld slechts één waarde voor de axiale snelheid van de elektronen waarvoor geldt dat deze constant is.

In de Twente Raman vrije-elektronenlaser wordt een 500 kV, 100 ns elektronen bundel gebruikt die door een veldemissiediode gemaakt wordt. De versnelspanning voor deze diode wordt door een Marx generator en een *pulse forming network* geleverd (zie ook Figuur 1). Na passage door de helische undulator wordt de elektronenbundel in de

wand van de golfpijp ingevangen. De opgewekte straling verlaat de golfpijp via een uitkoppelhoorn die de impedantie van de golfpijp langzaam transformeert naar die van de vrije ruimte. Een dun mylar folie dient als vacuümvenster. Hierdoor is de reflectie bij de uitkoppeling laag ($< 1\%$). Het systeem zal in deze configuratie min of meer als single pass versterker functioneren. Door een zogenaamde Bragg-reflector in te bouwen kan het systeem omgebouwd worden naar een oscillator configuratie. In ons geval is de reflector gedimensioneerd om ongeveer 30 % reflectie te geven voor een smalle band rondom de frequentie van 30 GHz, terwijl de transmissie 100 % is buiten deze band. Opgemerkt dient nog te worden dat beide systemen starten vanuit ruis.

De eerste experimenten zijn uitgevoerd in een versterkerconfiguratie. Hierbij was de gemiddelde stroom gedurende de puls ongeveer 750 A. Het maximale piekvermogen, dat gemeten is, is ongeveer 10 MW vergelijkbaar met wat elders voor soortgelijke systemen is behaald. Tevens is een studie gemaakt naar de spectrale verdeling in de K_{α} -band (24 - 40 GHz). Analyse van de verkregen resultaten gaf aan dat voor bepaalde combinaties van undulator en axiaal magneetveld naast de FEL interactie ook nog een ander interactie mechanisme aanwezig was. Het betrof hier een zogenaamde gyatroninteractie. Naast de spectrale informatie is dat voor een bepaalde setting van de magneetvelden ook bevestigd door de intensiteitsverdeling te meten. Het betrof hier een combinatie van TE_{11} (FEL) en TM_{01} (gyratron) modi waarbij de laatste dominant was.

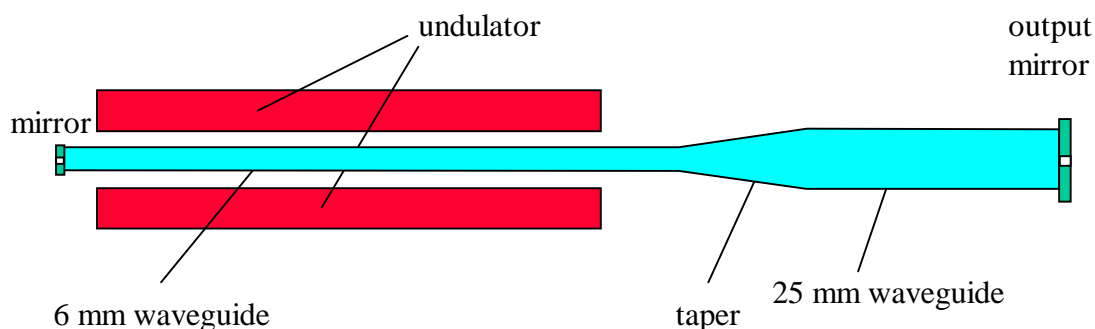
Om een oscillator configuratie te bestuderen en te kunnen vergelijken met de amplifier configuratie is een Bragg-reflector ontworpen. Tevens is de gemiddelde bundelstroom verlaagd naar ongeveer 200 A. Bovendien kan de interactielengte gevarieerd worden door een zogenaamde kickermagneet langs de undulator te schuiven. De resultaten van deze experimenten laten zich als volgt samenvatten. Zonder Bragg-reflector (dus in een versterkerconfiguratie) vertoont de spectrale verdeling een grote schot tot schot variatie. Deze is ook aanwezig in de totale energie van de stralingspuls. Het blijkt echter mogelijk te zijn een onderverdeling te maken tussen de gemeten spectra met slechts een beperkt aantal soorten verdelingen. Binnen een bepaalde verdeling zijn wel alle spectra gelijkvormig doch de amplitude kan variëren. Door het plaatsen van de Bragg-reflector (dus in de oscillatorconfiguratie) wordt zowel de spectrale verdeling gewijzigd als gestabiliseerd. Dit laatste wil zeggen dat voornamelijk slecht één soort spectrale verdeling gevonden wordt. De onvermijdelijke spreiding in experimentele condities (zoals bijvoorbeeld amplitude van en ruis op versnelspanning en stroom en de energiespreiding van de bundel) leiden voor een versterker slechts tot een beperkt aantal mogelijke toestanden van de output terwijl de oscillator een goed gedefinieerde toestand lijkt te kennen. Door het variëren van de interactie lengte hebben we kunnen aantonen dat het maximale vermogen bereikt werd binnen de undulator. Dit geldt niet alleen voor het totale vermogen maar ook voor de afzonderlijke componenten in het spectrum. De positie waarop de verschillende lijnen hun maximum bereiken varieert.

Compton FEL I

Dit is de eerste fase van het Compton FEL project. In dit stadium is de elektronen energie beperkt tot 7 MeV, waarmee ook de minimale golflengte vastligt. Het systeem is gebaseerd op een lineaire versneller (LINAC) met een fotokathode als elektronenbron, een hybride undulator en een geschikte resonator.

Er is veel onderzoek gedaan naar het vrij maken van de elektronen uit de fotokathode. Dit gebeurt met een door ons ontwikkeld "drive"-lasersysteem dat de kathode onder

specifieke condities belicht. Daarbij is uitgebreid onderzoek gedaan aan verschillende kathode materialen. Het hiervoor gebruikte lasersysteem heeft als basis een commerciële gemodelockte Nd:YLF laser. De lichtpulsjes (lengte 50 ps) hiervan worden via een fiber-tralie opstelling gecompriemd tot een pulsduur van 20 ps of minder. Uit de continue pulstrein wordt vervolgens een deel ‘geknipt’ met een opto-akoestische modulator dat versterkt wordt in een vijftraps ND:YLF versterker. Afhankelijk van het gebruikte fotokathode materiaal wordt het licht één of twee keer verdubbeld in frequentie in niet-lineaire kristallen zoals LBO (eerste verdubbeling) en twee maal BBO (tweede verdubbeling). Er is veel aandacht besteed aan de uiteindelijke bundelkwaliteit en de efficiëntie van de produktie van fotonen. Het onderzoek naar het kathode materiaal is begonnen met het optimaliseren van KCsSb kathodes. Het voordeel van deze kathodes, t.w. de gevoeligheid voor de tweede harmonische van de Nd:YLF laser, weegt niet op tegen de nadelen: korte levensduur tijdens bedrijf van de versneller en hoge gevoeligheid voor verontreinigingen. Ongeveer een jaar geleden is overgeschakeld op CsTe cathodes. Deze vereisen de vierde harmonische van de Nd:YLF laser om elektronen vrij te maken. De levensduur is veel langer: meerdere dagen ten opzichte van enkele uren voor de KCsSb kathodes. Enkele subonderzoeken van dit systeem betreffen voornamelijk de afhankelijkheid van de produktiemethode, op de efficiëntie en levensduur onder bedrijfscondities. Daarnaast zijn door ons nieuwe kathodematerialen gevonden zoals CsSb en KSb, met een aanzienlijke hoger rendement tot 20%. De lineaire versneller is in nauwe samenwerking met ons in het “Los Alamos Laboratory” ontworpen en gebouwd. Het is een RF-LINAC opererend op een frequentie van 1.3 GHz. Dit is de 16^e harmonische van de 81.25 MHz, zijnde de modelock-frequentie van de Nd:YLF laser. Deze afstemming is nodig om synchroniciteit te waarborgen tus-



Figuur 2 Resonator en undulator systeem van de Compton FEL.

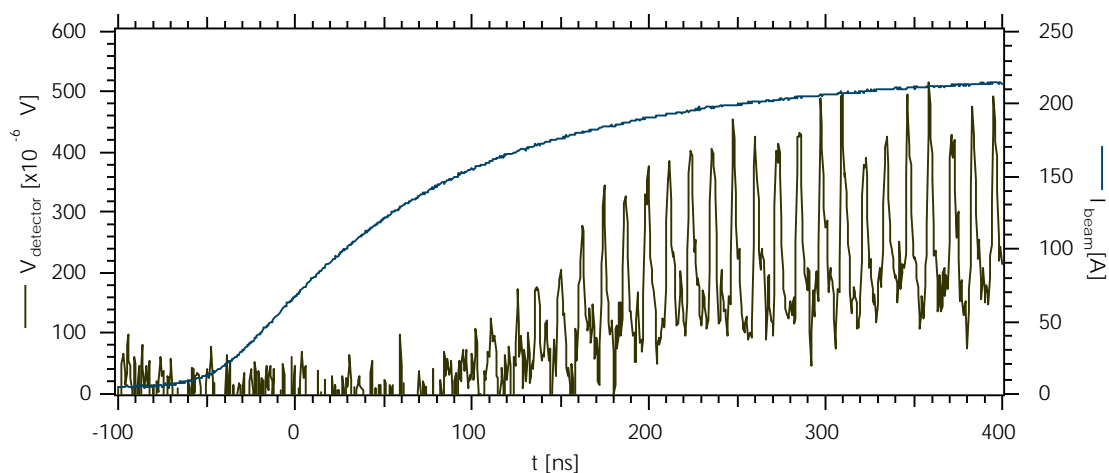
sen de geproduceerde elektronenpulsen en het versnellerveld. Een stabiliteit van 3 graden van een RF-cycle (6 ps) is hiervoor een vereiste.

De elektronenpulsen worden met behulp van stuur- en focusseerelementen geïnjecteerd in de undulator en resonator. Ook diagnostiek aan de elektronenbundel is op deze plaats een vereiste, om de afhankelijkheid van verschillende bundelparameters te kunnen relateren aan de geproduceerde straling. Diagnostische hulpmiddelen die we momenteel tot onze beschikking hebben zijn grotendeels in huis ontwikkeld en omvatten: stroommonitoren, bundel-positie-monitoren en bundel schermpjes. De laatste worden gebruikt om een visuele indruk te krijgen van de transversale dimensies van de elektronenbundel en om de emitantie te bepalen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het feit dat als een

elektronenbundel een medium ingeschoten wordt er ‘Optical Transition Radiation’ wordt geproduceerd. Deze straling is instantaan waardoor zelfs tijdsopgelost gemeten kan worden wanneer een camera met een korte sluitertijd (< 10 ns) wordt gebruikt.

De eigenlijke laser: undulator-resonator combinatie heeft een speciale structuur (zie Figuur 2) vanwege de lange golflengte in verhouding tot de kleine dimensies van de undulator. De undulator bestaat uit permanente magneten, om de flux te produceren, en polen, om de flux te geleiden. Het geheel heeft 50 perioden met een golflengte van 25 mm. Doordat in de polen een uitsparing is aangebracht is het systeem dubbel focusserend gemaakt om de elektronenbundel in de transversale richting circulair te houden. De afstand tussen de polen is 8 mm, wat een beperking oplegt aan de diameter (binnenmaat 6 mm diameter) van de vacuümpijp in de undulator. Omdat de resonator langer moet zijn dan de undulator en de elektronenbundel sterk divergerend is wanneer hij de undulator verlaat was het noodzakelijk om achter de undulator de bundelpijp te verwijden naar 25 mm diameter. Om reflecties van het geproduceerde licht te voorkomen is gekozen voor een taper. De twee spiegels die de uiteindelijke resonator vormen zijn vlakke spiegels met een gat erin om, ten eerste de elektronen bundel door te laten, en ten tweede het licht uit te koppelen. Een nadeel van dit systeem is dat ook aan de ingang van de resonator voor de elektronen licht wordt uitgekoppeld.

De combinatie van golfpijp-structuur en gat-gekoppelde spiegels leidt tot interessante omstandigheden betreffende de werking van de FEL. Doordat er verschillende fase-snelheden horen bij de verschillende transversale golfpijpmodi kunnen er meerdere golflengten simultaan resonant zijn. Voor een constante fase snelheid zou slechts één golflengte resonant zijn. Dit is ook experimenteel waargenomen (zie artikel elders in



Figuur 3 Groei van de licht micropulsjes. Elk later pulsje reflecteert de intra-cavite intensiteit na een extra rondgang. Verzadiging treedt op na ongeveer 20 rondgangen. De vloeiende curve is de gemiddelde stroom zoals deze is gemeten door de stroommonitor

dit tijdschrift).

Door de hoge piek stroom en hoge kwaliteit van de elektronen bundel is het mogelijk snel in de verzadiging te komen. Figuur 3 geeft de licht intensiteit weer van de lichtpulsjes als functie van het aantal rondgangen (in de figuur aangegeven met een willekeurige tijd). Dergelijke hoge versterking maakt het in principe mogelijk om onderzoek te verrichten aan zelf versterkende spontane emissie. Pogingen om dit aan te tonen zijn tot op heden mislukt, omdat de opstartfase van dit verschijnsel langer duurt

dan gewoonlijk wordt aangenomen. De experimenten met de golpijp structuur hebben ons het inzicht gegeven dat dit te maken heeft met een verandering van de fasesnelheid van het licht tengevolge van de aanwezigheid van de hoge dichtheid van de elektronenbundel. Hierdoor verschuift de resonantie van het licht, en wel zover dat de resonantiefrequentie imaginair kan worden. De grote verschuiving treedt op omdat de elektronenbundel zich gaat gedragen als een mini-golpijp voor het geproduceerde licht. Op het moment zijn we bezig om te onderzoeken hoe we deze grenzen kunnen verleggen om het effect als nog te meten. Met name onderzoek op de grens van dit gebied is van belang, omdat dit kan leiden tot een werkelijk inzicht in de opbouw van zelf versterkende spontane emissie, een techniek die veel aandacht krijgt voor het genereren van Röntgenstraling.

Compton FEL II

Tot de eerste fase van het project hoorde ook het ontwikkelen van een naversneller om de energie van de elektronen te verhogen van 6 MeV tot 25 MeV. Dit wordt gedaan met een zogenaamd Race-Track-Microtron (RTM). Het ontwerp en de bouw van dit instrument is uitgevoerd in vakgroep deeltjesfysica aan de Technische Universiteit Eindhoven. In deze groep zijn simultaan twee RTM's ontworpen en gebouwd, één voor het FEL project, en één als voorversneller voor de opslagring EUTERPE. Een schematisch overzicht van deze laatste staat in Figuur 4 afgebeeld. Het Twentse RTM wijkt hiervan af in de zin dat het aantal banen gelijk is aan negen en niet dertien, en het aantal versnel-cavities is 3 in plaats van 9.

Eén van de redenen om te kiezen voor een race-track-microtron is het behoud van kwaliteit van de bundel. De transversale emitantie kan goed in de hand worden gehouden, terwijl de longitudinale emitantie zelfs wordt verbeterd. Omdat de absolute energiespreiding behouden kan blijven neemt de relatieve energie spreiding af, en dus de

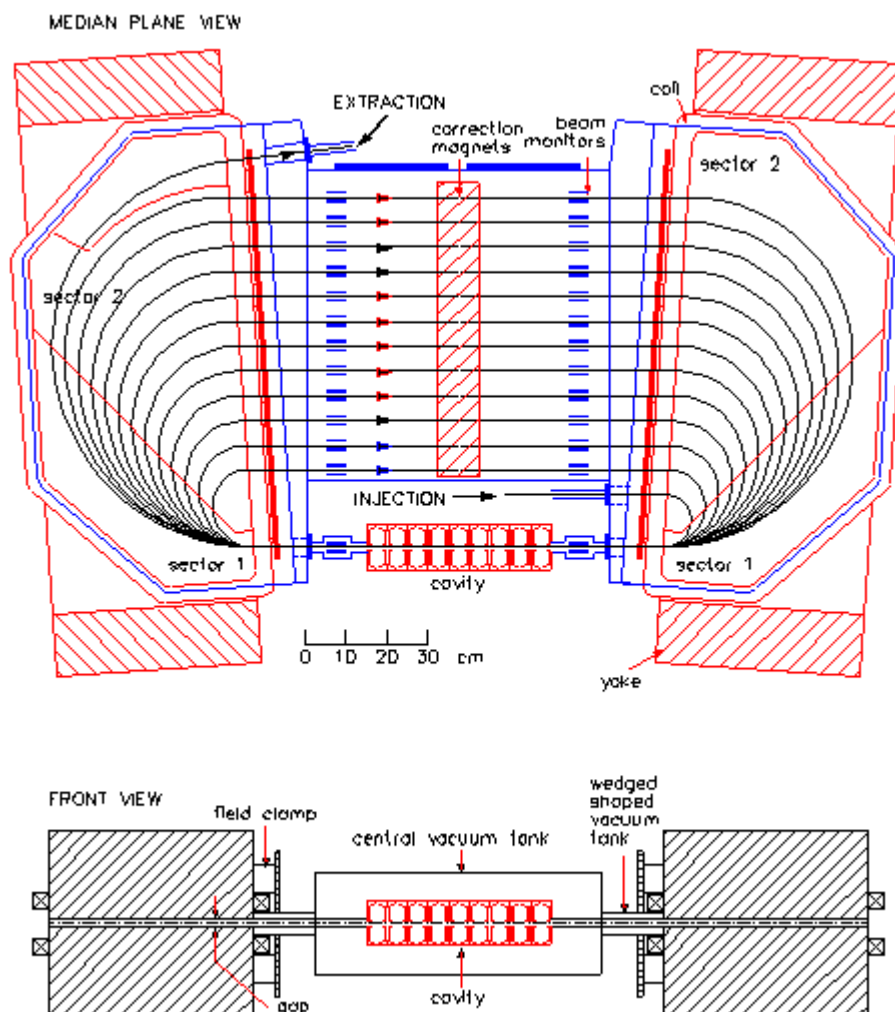
Tabel 2 samenvatting van de eigenschappen bij de twee fases van het project

	fase I	fase II
versneller	LINAC	LINAC + RTM
versneller energie	6 MeV	25 MeV
RF-frequentie	1.3 GHz	1.3 GHz
micro-puls duur	20 ps	25 ps
micro-puls frequentie	81.25 MHz	81.25 MHz
piek stroom	350 A	< 100 A
macro-puls duur	15 μ s	15 μ s
macro-puls frequentie	10 Hz	10 Hz
undulator periode	25 mm	25 mm
aantal undulator perioden	50	40
undulator parameter K	1	1
stralings golflengte	>200 μ m	>10 μ m
optische resonator lengte	1.85 m	1.85 m

longitudinale emitantie. De elektronenpulsduur neemt slechts licht toe. Bijkomende voordelen zijn de compactheid van de versneller. De maximaal haalbare piekstrom wordt verwacht rond de 100 A te liggen.

In de tweede fase van het project is het de bedoeling het RTM in te bouwen. De undulator zal de zelfde zijn als is fase I, met mogelijk een wijziging in het aantal perioden.

Omdat de geproduceerde golflengte nu in de buurt van de $10\ \mu\text{m}$ ligt zal de resonator aangepast worden.



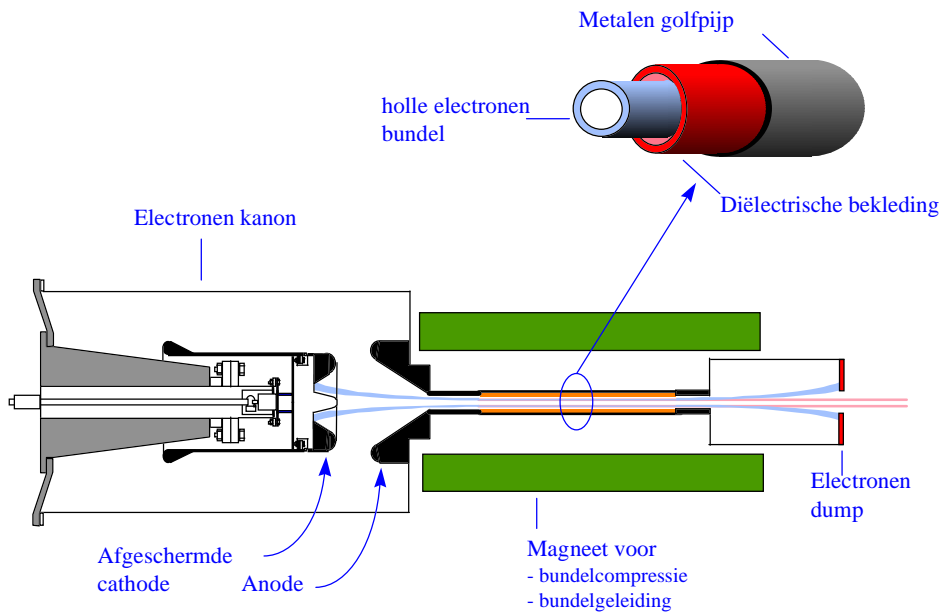
Figuur 4 Overzicht van het race-track-microtron (in dit geval de Eindhoven versie).

Cerenkov FEL

Het doel van het project is het ontwikkelen van een geavanceerde hoog vermogen verstembare Cerenkov Vrije-Elektronen-Laser (CFEL), die millimeter en submillimeter straling produceert. Ten opzichte van de bestaande, verstembare stralingsbronnen werkzaam in dit gebied zal zowel het gemiddeld als piek vermogen enkele orden hoger zijn. Een schematische weergave van een CFEL is te zien in Figuur 5.

Het verschil van een CFEL met een normale FEL zit in het 'medium' dat de laserwerking veroorzaakt. Bij een CFEL wordt geen undulator gebruikt maar is een diëlectrische materiaal aangebracht op de binnenkant van een golfpijp. De oplossingen van de

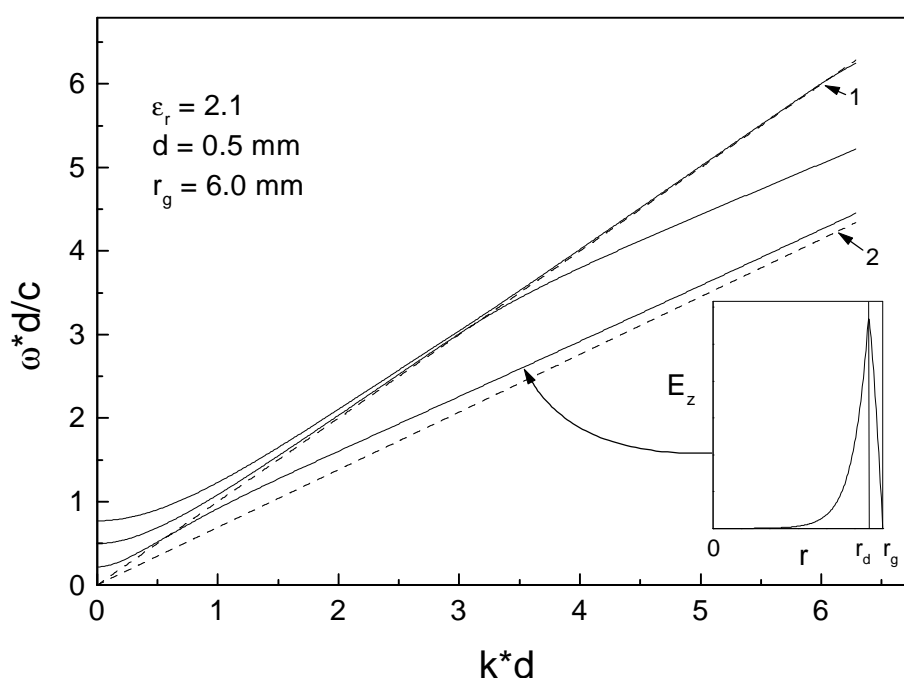
Maxwell vergelijkingen voor een dergelijke geometrie laten zien dat er twee klassen van modi zijn. Voor de eerste geldt dat de fasesnelheid, v_ϕ , groter is dan de lichtsnelheid in vacuüm, c , terwijl voor de andere klasse de v_ϕ juist kleiner is (zie ook Figuur 6). In het eerste geval betreft het een 'normale' golfpijp mode terwijl het andere geval opgevat kan worden als een mode die zich voornamelijk voortplant door het diëlectrisch materiaal. Er dient nog opgemerkt te worden dat alleen voor modi met azimuthale symmetrie (d.w.z. modes met alleen z en r afhankelijkheid) geldt dat er bovendien onderscheid tussen TE en TM modi gemaakt kan worden. De stralingspatronen die niet



Figuur 5 Schematische weergave van een Cerenkov vrije-elektronenlaser

voldoen aan deze symmetrie hebben zowel een E_z als B_z component. Het zijn juist de modi met $v_\phi < c$ die interessant zijn voor de CFEL, immers de snelheid van de elektronen kan gelijk zijn aan v_ϕ . Bovendien hebben deze de eigenschap dat het veld doorlekt naar het vacuüm met een min of meer exponentieel verval met de golflengte als karakteristieke afstand. Door nu de elektronen dicht langs het diëlectrische materiaal te laten bewegen kan er energie uitwisseling plaatsvinden. Immers als het elektrisch veld van de betreffende mode een longitudinale component, E_z , heeft zullen de elektronen, afhankelijk van de relatieve fase, versneld of afgeremd worden. Deze snelheids-modulatie zal na een zekere propagatie omgezet worden in een dichtheids-modulatie met als karakteristieke afstand de golflengte van het stralingsveld. Voor het beschouwde geval van gelijke snelheden vindt de opeenhoping van elektronen plaats op posities waar E_z gelijk aan nul is. Omdat gemiddeld evenveel elektronen versneld als afgeremd worden is er geen netto energie uitwisseling. Door nu, net als bij een gewone FEL, de elektronenbundel een iets andere energie te geven zal de opeenhoping plaatsvinden rondom posities waarvoor E_z ongelijk aan nul is. Het merendeel van de elektronen zullen nu energie afstaan of opnemen uit het stralingsveld d.w.z. netto energie uitwisseling is mogelijk geworden.

Figuur 6 laat tevens een aantal belangrijke andere eigenschappen van de CFEL zien. In tegenstelling tot normale FEL neemt bij de CFEL de golflengte toe (d.w.z. de frequentie neemt af) met toenemende elektronenenergie. Dit heeft als voordeel dat een CFEL compacter gebouwd kan worden en minder afscherming nodig heeft dan een normale FEL (i.v.m. Röntgenstraling die wordt opgewekt als de elektronen ingevangen worden). Tevens moeten de elektronen een minimale snelheid, v_z , hebben om laserwerking te krijgen ($v_z > c/\sqrt{\epsilon_r}$). Door de exponentiële afval van E_z zal de koppeling tussen stralingsveld en elektronenbundel afnemen met afnemende golflengte. Het vermogen zal dus afnemen met kleiner wordende golflengte, enerzijds doordat de gain minder wordt,



Figuur 6 *Dispersiekrommen voor de laagste 3 TM modi. Let op de asymptoten die corresponderen met de lichtlijn in vacuüm (1) en in een diëlectrisch materiaal (2). De inzet toont de radiale afhankelijkheid van de longitudinale elektrische veldcomponent van een stralingsmode die koppelt met de elektronenbundel. Hier is k de longitudinale component van de golfvector, d de dikte van het diëlectrisch materiaal en r_g de radius van de golfpijp en $r_d = r_g - d$.*

anderzijds doordat het opgeslagen vermogen in de elektronenbundel afneemt. Bij de beoogde CFEL kan de elektronenenergie van 200 tot 500 keV gevarieerd worden en zullen verschillende diëlectrische materialen getest worden. Hiermee is het mogelijk een spectrum te beslaan van 6 mm tot 700 μm . Om bijvoorbeeld hetzelfde gebied te bestrijken met een conventionele FEL zijn energieën nodig van 500 keV tot 2.5 MeV, bij het gebruik van een vaste undulator met een periode van 2.5 cm. Wat betreft de prestaties laten simulaties zien dat het piekvermogens in de orde van 100 kW bij 750 μm tot multi-megawatts bij 6 mm mogen worden verwacht. Dit zou overeenkomen met efficiënties van een paar tiende van een procent tot ongeveer 20%. Het systeem is op dit moment gedeeltelijk opgebouwd en de eerste testen met de elektronenbundel zijn uitgevoerd.

De mogelijke toepassingen zijn zeer verscheiden. Omdat de CFEL conceptueel gelijk is aan de lopende-golf buizen in radar systemen kan de CFEL leiden tot de ontwikkeling van radarsystemen opererend op een veel kleinere golflengte. Deze radarsystemen kunnen dan worden ingezet voor bijvoorbeeld hoge resolutie radar-imaging en remote sensing. Het systeem zou ook toegepast kunnen worden in de plasmafysica en/of plasmachemie. Ook toekomstige generaties hoge-gradiënt versnellers kunnen profiteren van de CFEL als bron voor het versnellerveld. Versies met een laag (eventueel continue) vermogen kunnen als bron gebruikt worden in de spectroscopie.