



Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft
für Synchrotronstrahlung m.b.H.

High-order Harmonic Generation as a possible Seed Source for the BESSY Free Electron Laser



Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft
für Synchrotronstrahlung m.b.H.

High-order Harmonic Generation als eine mögliche Seed-Quelle für den BESSY Freie Elektronen Laser

- 1. Der Freie Elektronen Laser (FEL)**
- 2. High-order Harmonic Generation (HHG)**
- 3. HHG Simulation**
- 4. HHG seeded FELs**
- 5. Zusammenfassung und Ausblick**

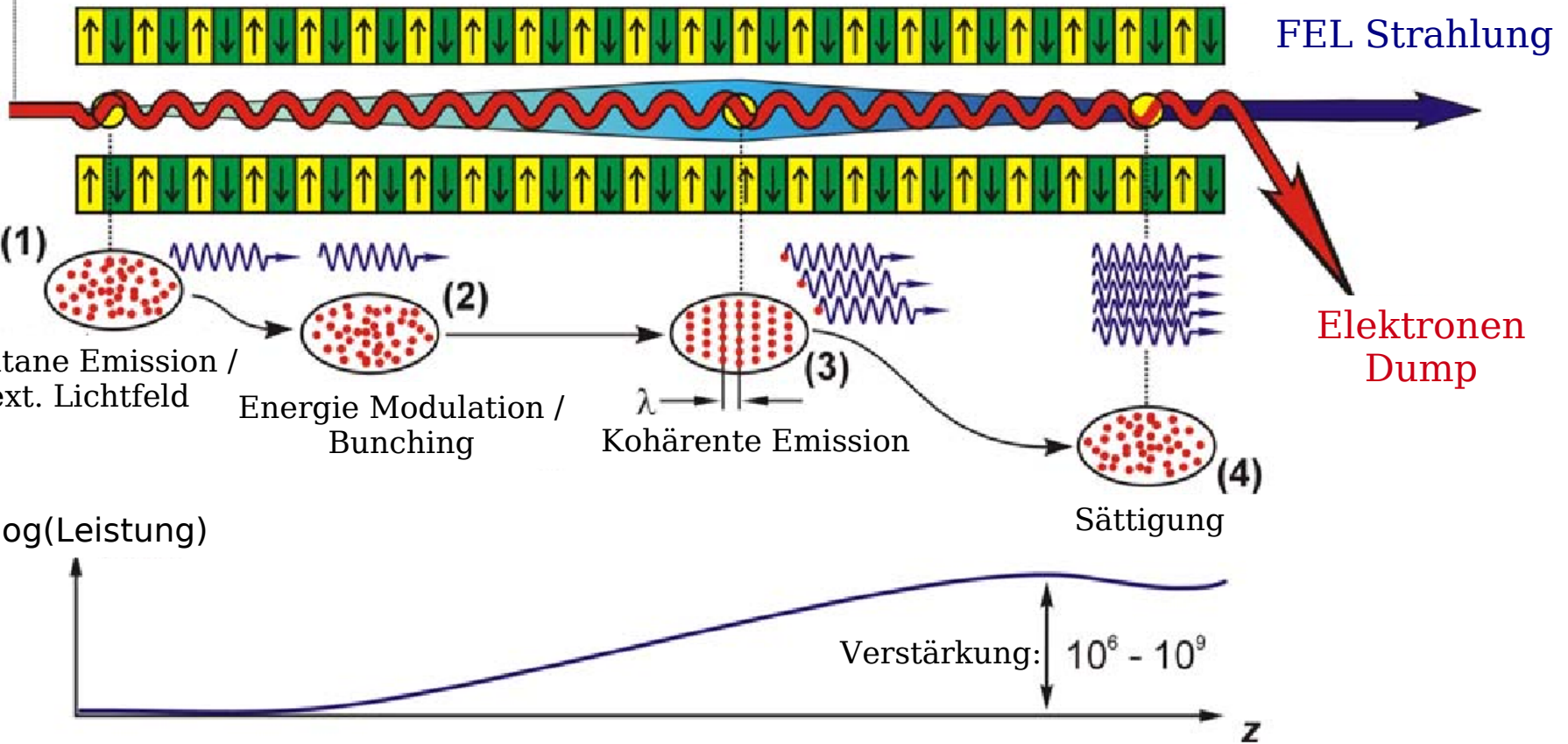
Der Freie Elektronen Laser (FEL)

Der FEL – Eine Quelle für Roentgen- und UV-Licht

- durchstimmbar über weiten Wellenlängenbereich (einige μm bis sub-nm)
(FLASH, DESY Hamburg, Oktober 2007: 6.5nm)
 - hohe Brillanz (Zahl der Photonen je Fläche, Raumwinkel und Zeit pro 0.1% Bandbreite)
 - hohe Kohärenz
 - ultrakurze Pulse möglich mit seeded FELs (fs-Bereich)
 - Verbesserung des FEL durch HHG möglich
 - kurze Wellenlängen
 - kurze Pulse
- } bei deutlich verkürztem experimentellen Aufbau

Elektronen-Strahl

Undulator



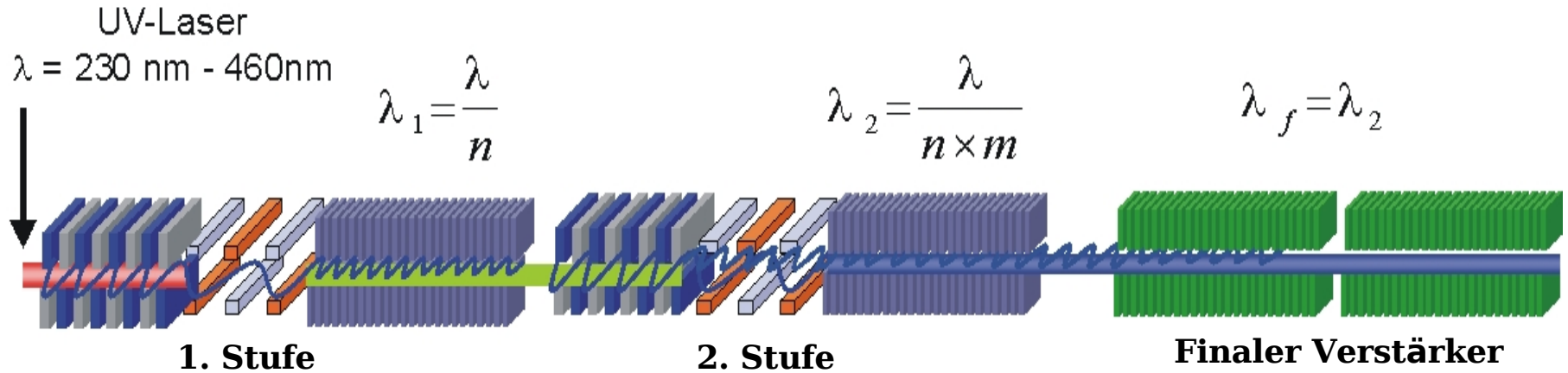
Starten des Lichtentstehungsprozesses

	SASE FEL	Seeded FEL
Initiierung	spontane Emission	ext. Lichtquelle
Energiemodulation	langsam	schnell
Undulatorlänge	> 100 m	einige 10 m
FEL-Pulslänge bestimmt durch	Elektronen-Puls (>50fs)	Seed Puls (wenige fs)
Spektrum	mehrere Moden, kurze longitud. Kohärenz	eine schmalbandige Mode
spektrale Stabilität	stochastischer Prozess ->Variation der relativen Intensitäten	keine Stochastik ->konstantes Spektrum
erreichbare Wellenlänge	im Prinzip beliebig kurz	durch externen Seed vorgegeben

SASE – Self Amplified Spontaneous Emission

Seeded – Geimpft

Kaskade von HGHG Stufen zur Erzeugung sehr kurzer Wellenlängen

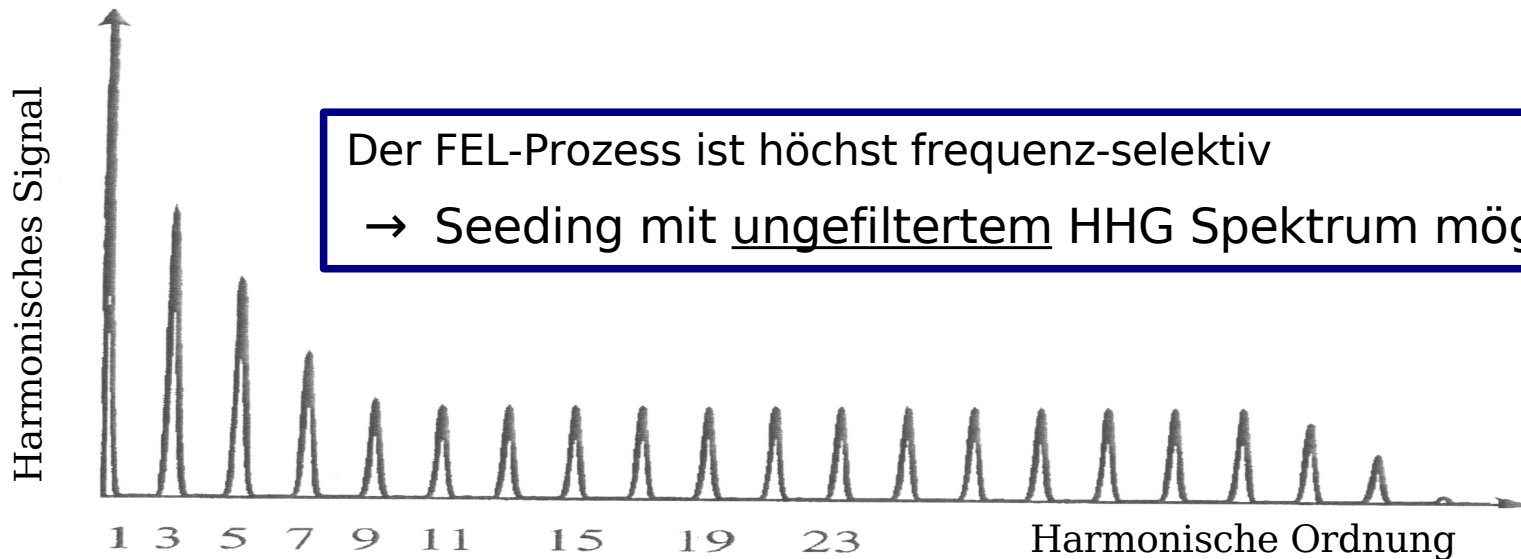
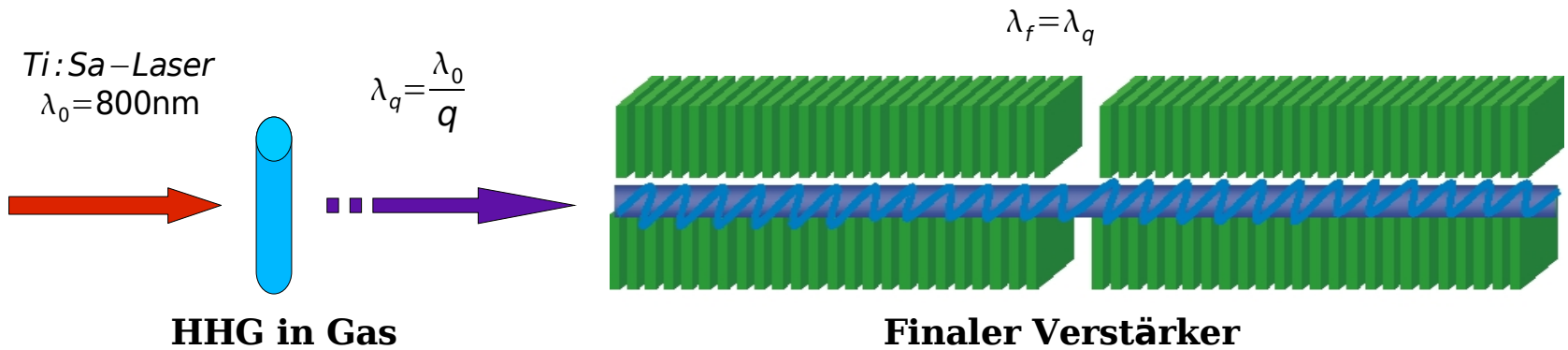


- Radiator resonant zu einer Harmonischen des Seed-Lasers
- Seeding der nächsten Stufe mit FEL-Licht des Vorgängers

- Rauschverstärkung in jeder Stufe: $\frac{P_{\text{rausch}}}{P_{\text{signal}}} \sim n^2$

- Unhandliches Setup (Feintuning, Synchronisation, ...)

HHG geseedeter FEL

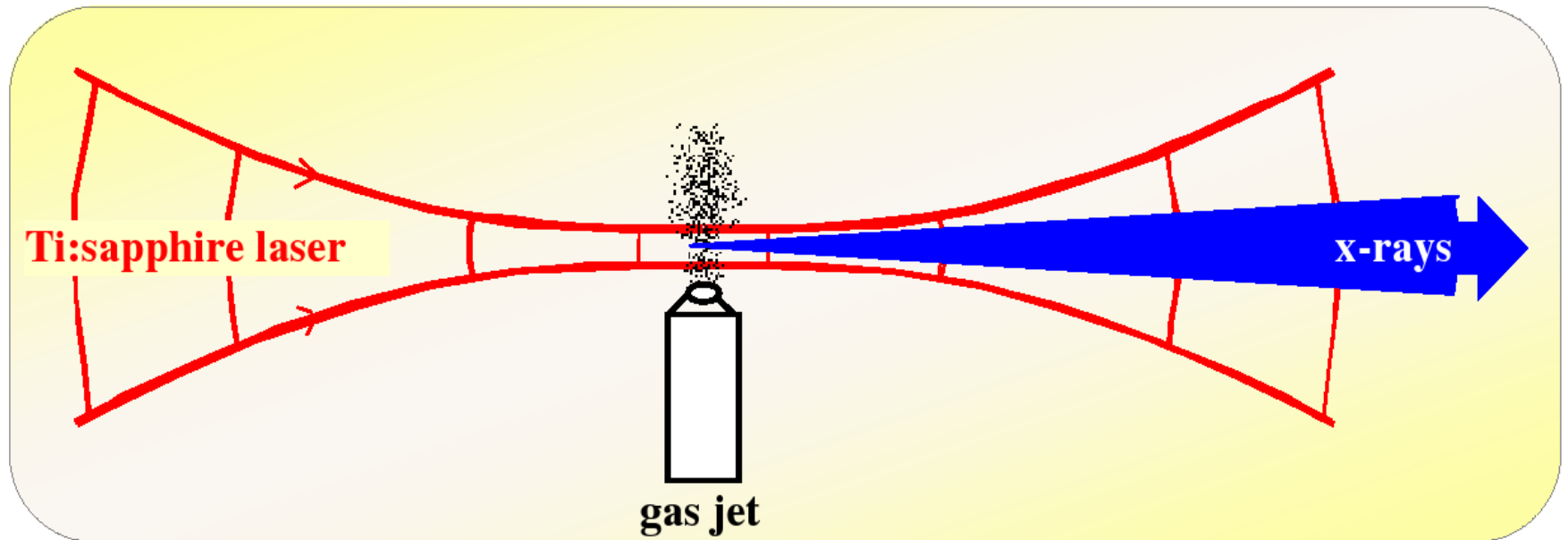


Der FEL-Prozess ist höchst frequenz-selektiv
 → Seeding mit ungefiltertem HHG Spektrum möglich!

High-order Harmonic Generation (HHG)

Was ist High-order Harmonic Generation ?

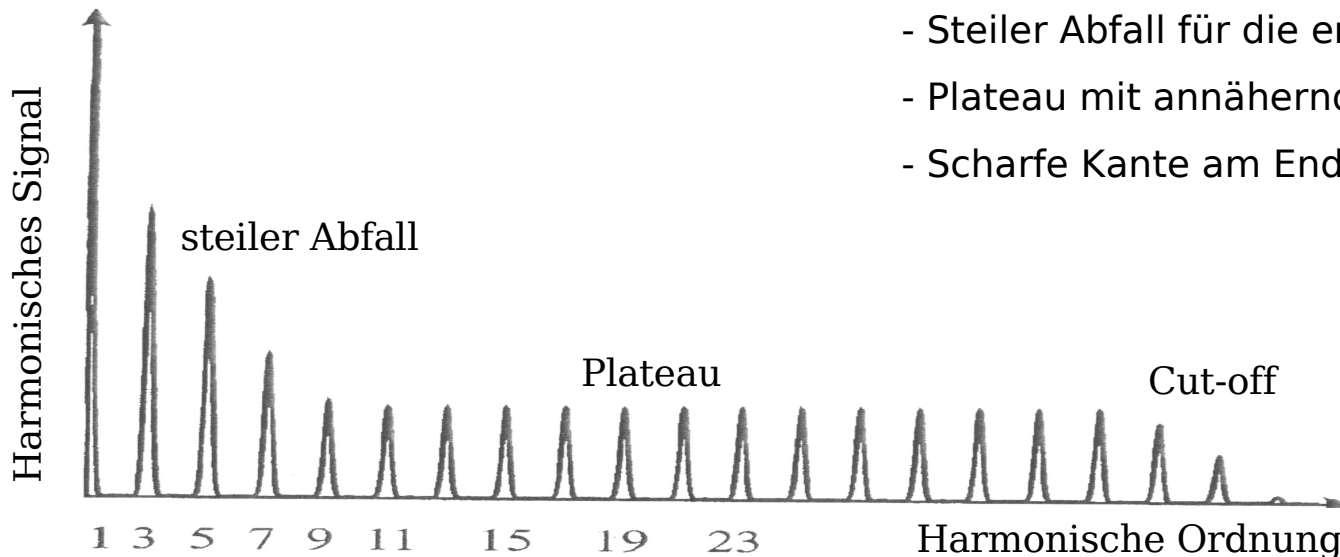
- Kurze, intensive Laserpulse wechselwirken mit atomischem Gas.
- Die Atome "antworten" nichtlinear und strahlen ein Vielfaches der anregenden Fundamentalfrequenz ab.



Was ist High-order Harmonic Generation ?

- Kurze, intensive Laserpulse wechselwirken mit atomischem Gas.
- Die Atome "antworten" nichtlinear und strahlen ein Vielfaches der anregenden Fundamentalfrequenz ab.

Ein typisches HHG-Spektrum:



- Steiler Abfall für die ersten Harmonischen
- Plateau mit annähernd konstanter Intensität
- Scharfe Kante am Ende (Cut-off)

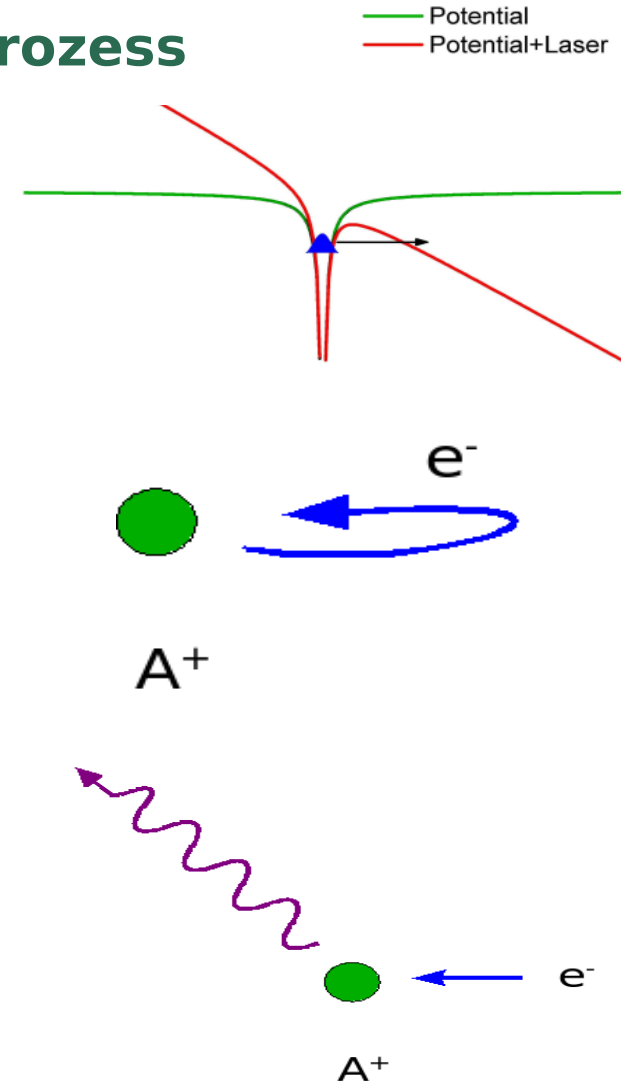
Simple Man Model: Ein 3-Schritt-Prozess

1. Ein Atom im starken Laserfeld wird zur Zeit t_0 ionisiert.

Annahme: Das freigewordene Elektron hat die Anfangsgeschwindigkeit Null.

2. Das Elektron wird durch das Laserfeld beschleunigt und nach Wechsel dessen Vorzeichens mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zum Atomrumpf zurückbefördert.

3. Rekombination mit dem Atomrumpf unter Abstrahlung der gewonnenen kinetischen Energie.



Klassisches Cut-off Gesetz:

$$\hbar \omega_{max} = E_{max} = I_p + 3.17 U_p$$

Ponderomotives Potential: $U_p = \frac{q^2 E^2}{4 m \omega_0^2} = \frac{q^2}{16 \pi^2 m c^2} E^2 \lambda^2$

Nicht enthalten im Simple Man Model:

- Interferenz &
- Diffusion von Elektronen-Wellenpaketen



Quantenmechanisches Modell benötigt!

Das Lewenstein-Modell

Eine quantenmechanische Näherung des HHG-Prozesses

nach M. Lewenstein et al. - Phys. Rev. A 49, 2117 - 2132 (1994)

Vorraussetzungen:

$$U_p \geq I_p \gg \hbar\omega_0 \quad (\text{typisch: } I_p \approx (5-20)\hbar\omega_0)$$

$$U_p < U_{sat} \quad \text{Sättigungsenergie, bei der alle Atome ionisieren}$$

Grundannahmen:

- 1)** Der Beitrag aller gebundenen Zustände zur Entwicklung des Systems kann mit Ausnahme des Grundzustandes vernachlässigt werden.
- 2)** Die Erschöpfung des Grundzustandes kann vernachlässigt werden. ($\rightarrow U_p < U_{sat}$)
- 3)** Im Kontinuum darf das Elektron als freies Teilchen im elektrischen Feld betrachtet werden.
-> Das Potential $V(x)$ des Atomrumpfes hat keine Auswirkung auf die Bewegung des Elektrons.

Lewenstein-Modell: Theorie

Zeitabhg. Schrödingergleichung:

$$(\hbar=c=m_e=e=\omega_0=1)$$

$$i|\dot{\Psi}(\vec{r}, t)\rangle = \left[-\frac{1}{2}\hat{\nabla}^2 + \hat{V}(\mathbf{x}) - E(t)\hat{x} \right] |\Psi(\vec{r}, t)\rangle$$

Laserpotential
↓

Approximierte Lösung:

$$x(t) = i \int_0^\infty d\tau \underbrace{\left(\frac{\pi}{\epsilon + i\tau/2} \right)^{3/2}}_{\text{Flugzeit * Laserfeld}} \times E(t - \tau)$$

$$\times d_x [p_{st}(t, \tau) - A_x(t - \tau)]$$

$$\times d_x^* [p_{st}(t, \tau) - A_x(t)]$$

$$\times \exp[-iS_{st}(t, \tau)]$$

$$+ c.c.$$

Dipolmatrixelement:
Grundzustd. -> Kontinuum
und zurück



Spezielle Phase der
jeweiligen Elektronen
Trajektorie



EM-Wellengleichung in paraxialer Näherung

$$\nabla_{\perp}^2 E_i(r, z, t) - \frac{2}{c} \frac{\partial^2 E_i(r, z, t)}{\partial z \partial t} = G_i(r, z, t)$$

Quellterm für den erregenden Laser

$$G_1(r, z, t) = \frac{\omega_p^2(r, z, t)}{c^2} E_1(r, z, t)$$

Quellterm für das generierte HHG Licht

$$G_q(r, z, t) = \mu_0 \frac{\partial^2 P_{nl}(r, z, t)}{\partial t^2}$$

Nicht-lineare Polarisation des Gasmediums

$$P_{nl}(r, z, t) = [n_0 - n_e(r, z, t)] R(r, z, t) x(r, z, t)$$

Phasen-Anpassung

- makroskopisches Signal nur, falls das Licht der einzelnen Atome konstruktiv interferiert

$$\Delta \mathbf{K} L_{\text{med}} < \pi$$

- makroskopische HHG-Spektren abhängig von der Phase des erregenden Lasers

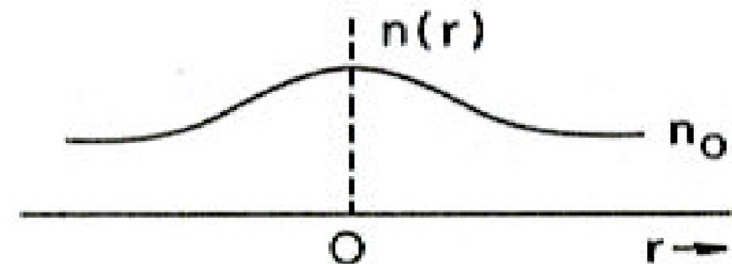
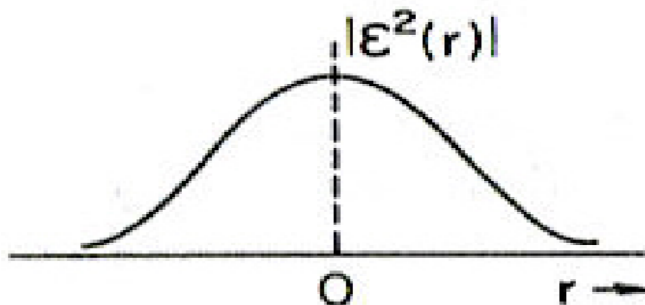
$$\Delta \mathbf{K} = \mathbf{k}_q + \mathbf{k}_I - q\mathbf{k}_0$$

-> starker Einfluss durch Lage des Laserfokus

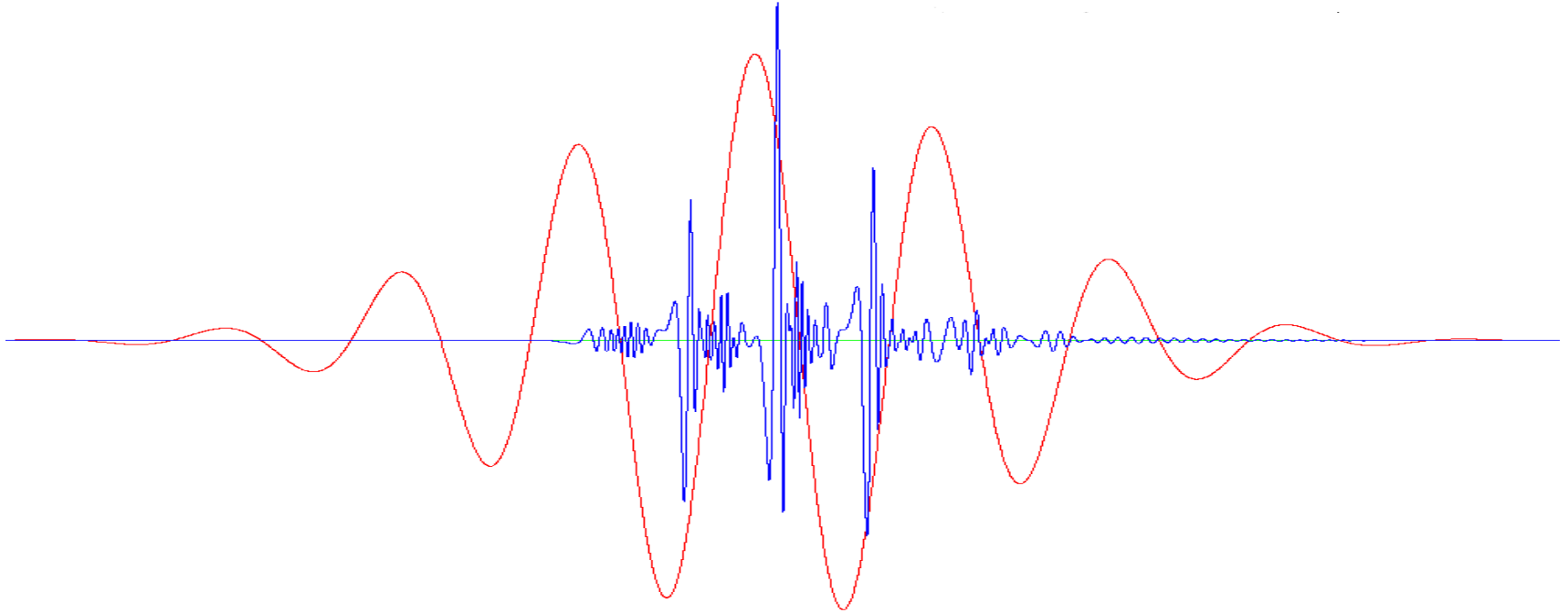
Selbstfokussierung

- Laser mit axial-gauss'schem Intensitätsprofil in Medium mit nichtlinearem Brechungsindex

- höhere optische Dichte auf Strahlachse -> effektive Sammellinse

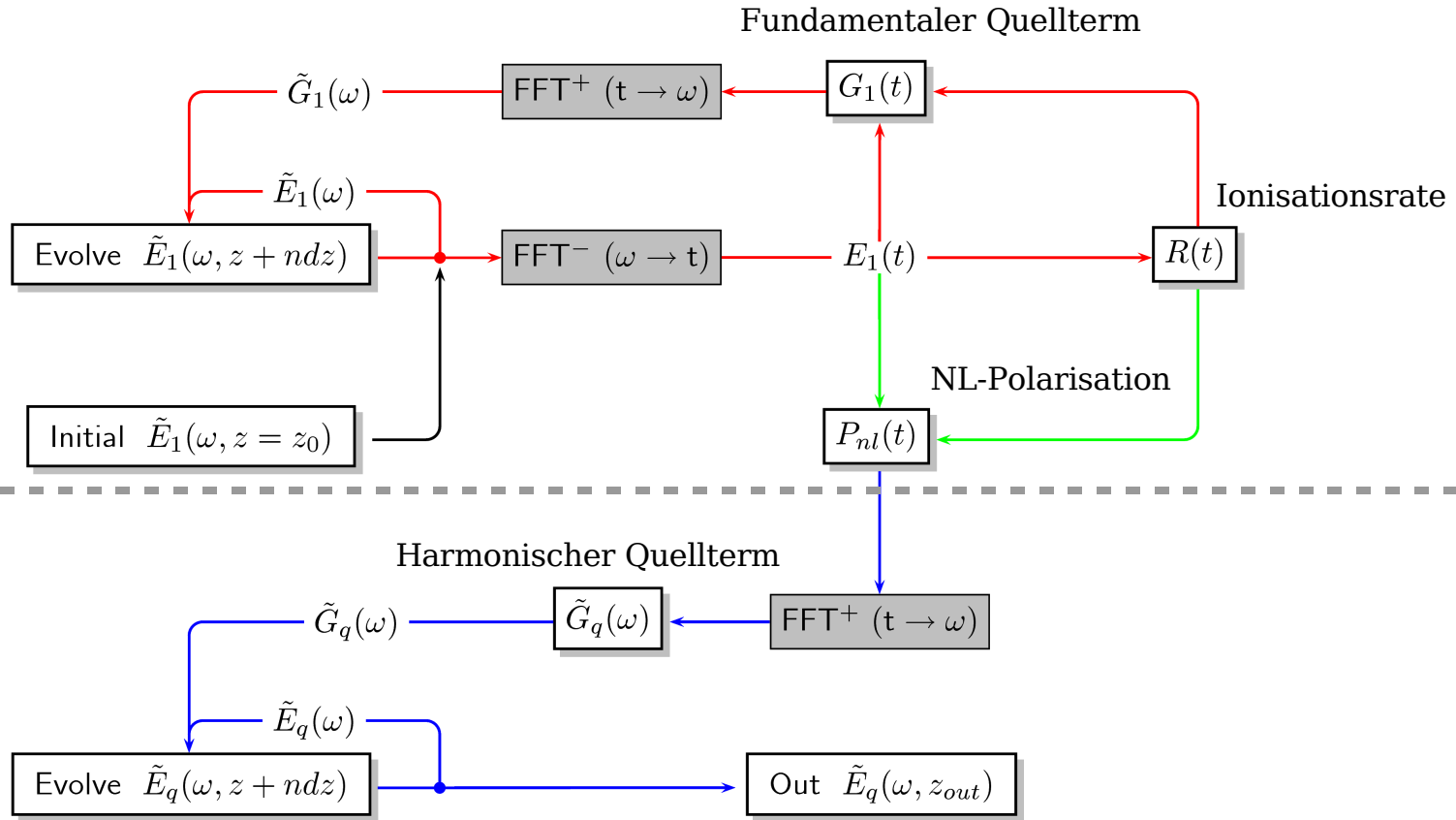


RHYNO



**Ein Programm zur Simulation des
HHG-Prozesses**

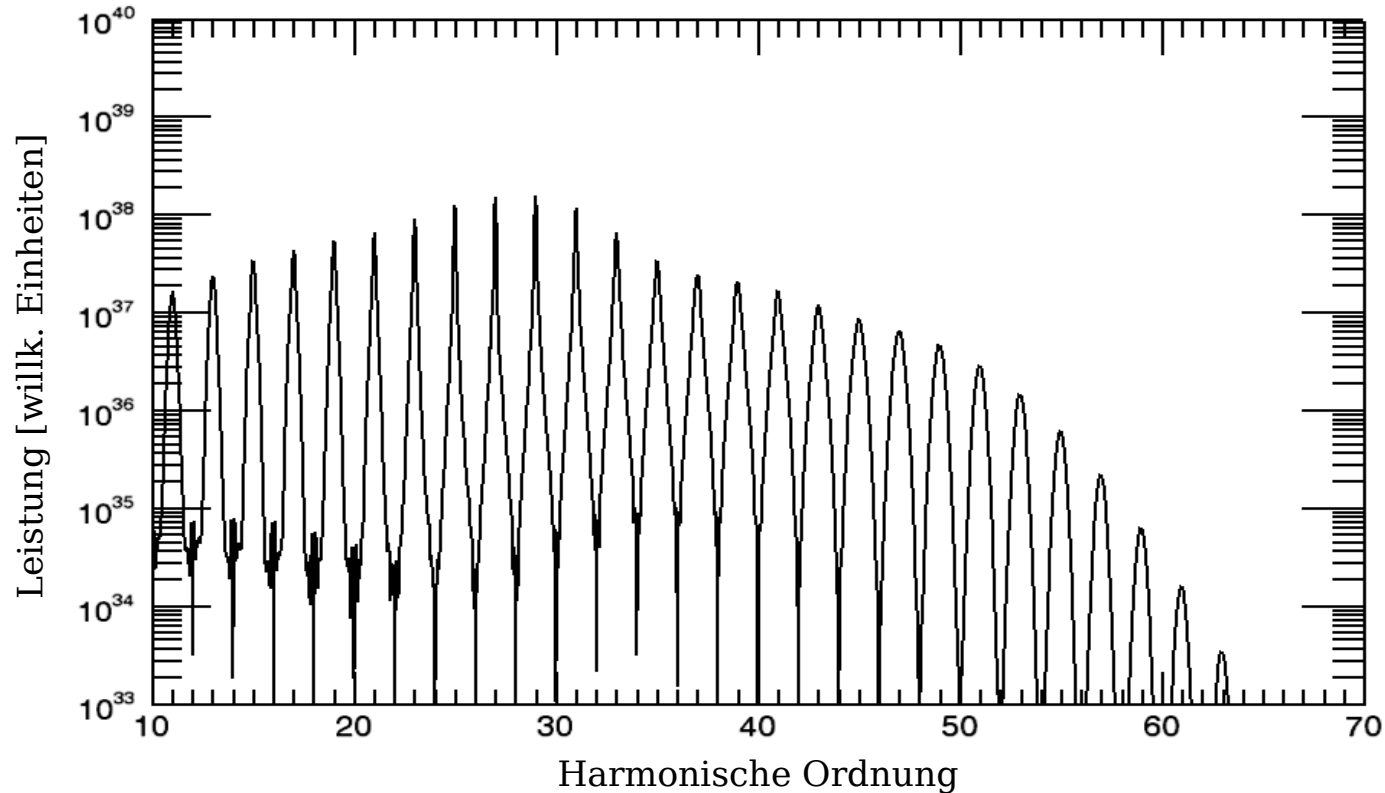
Flussdiagramm für den HHG Simulationscode RHYNO



Merkmale von Rhino

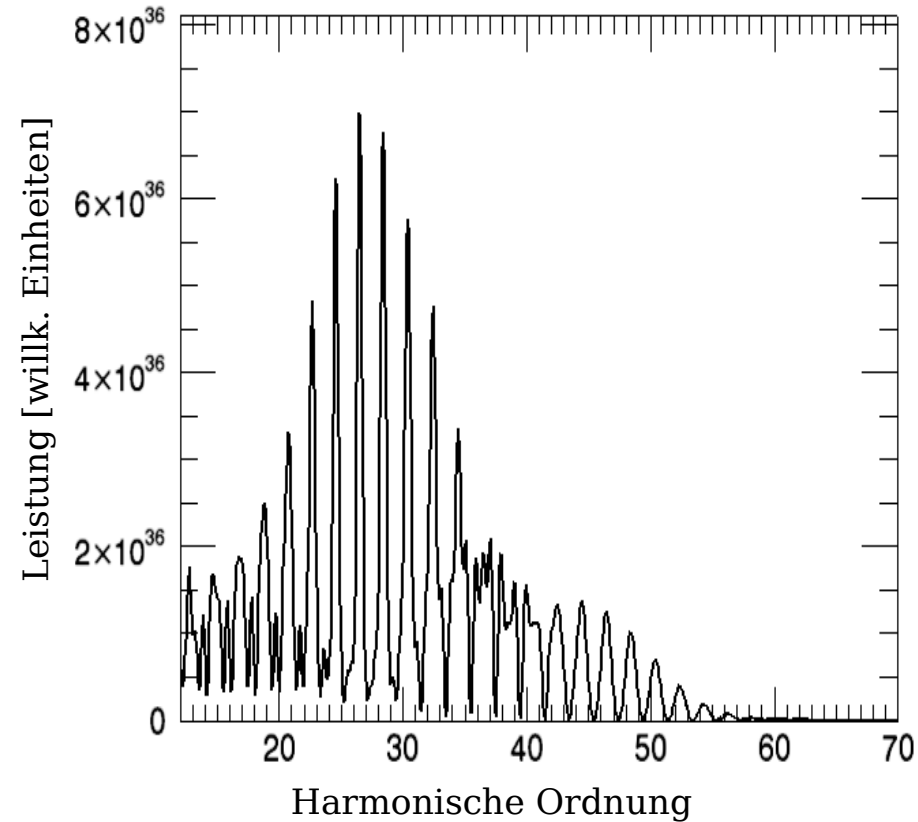
- 3D-Simulation des HHG Prozesses in Gasen (transversal radialsymmetrisch)
 - Ein-Atom-Dipolmoment
 - Formierung der makroskopischen harmonischen Strahlung
- Berücksichtigt kollektive Effekte während der Propagation durch das Gasmedium
 - Phasen-Anpassung
 - Selbstfokussierung
- Ausgabe-Daten:
 - einfach aufzubereiten für FEL-Codes, z.B.: Genesis 1.3
 - skalierbar, um physikalische Werte zu erhalten

Simulationsergebnisse – Eine typische Ausgabe von RHYNO

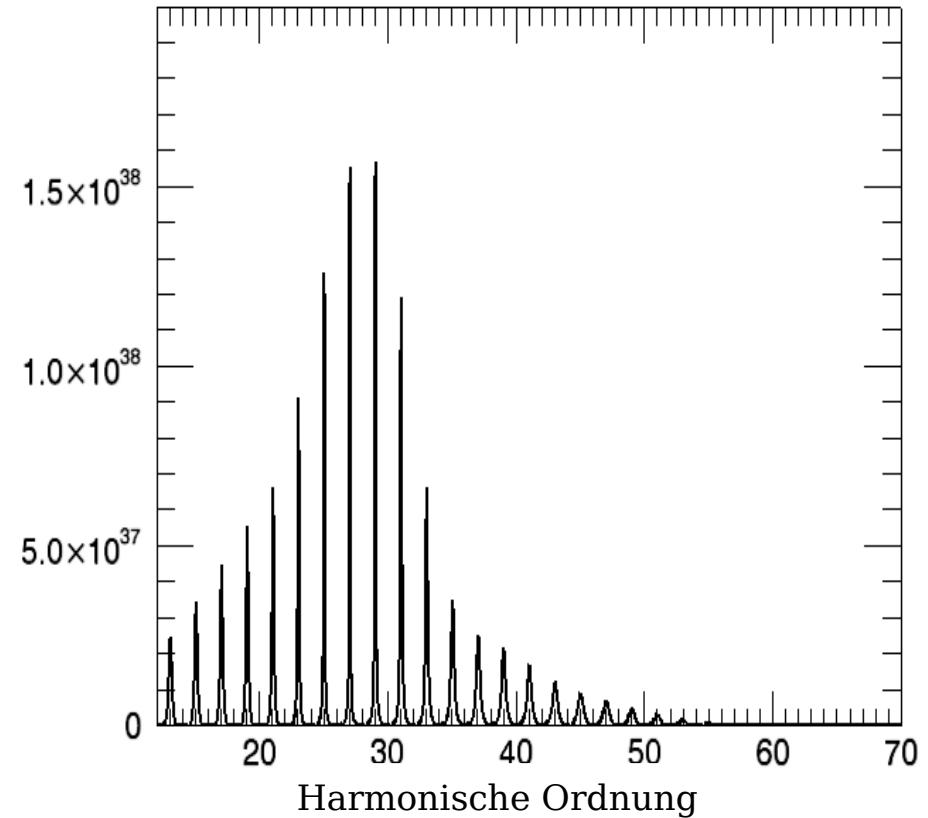


Pulsdauer: $\tau=30\text{fs}$ $I_0=7.5 \cdot 10^{14} \text{W/cm}^2$

Simulationsergebnisse – Einfluss der Pulsdauer

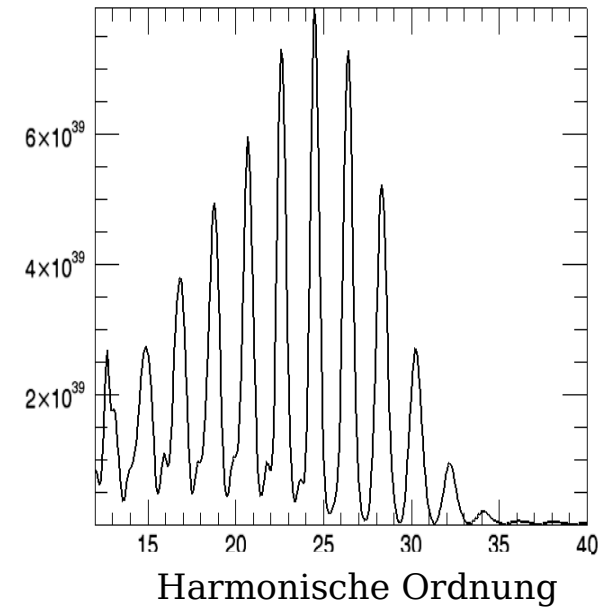
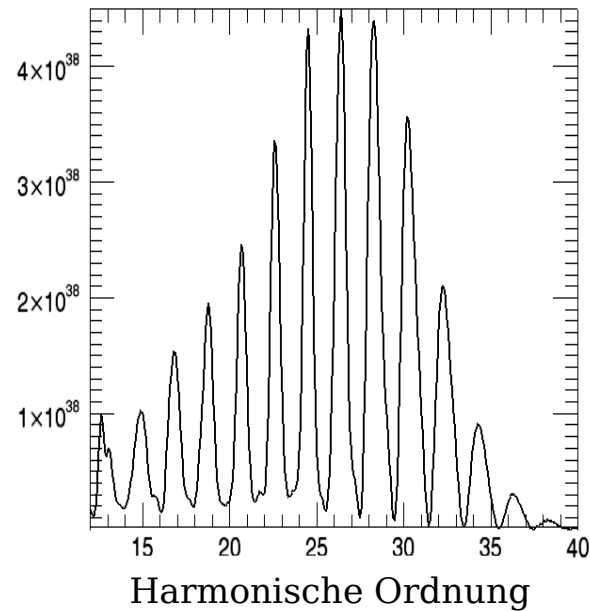
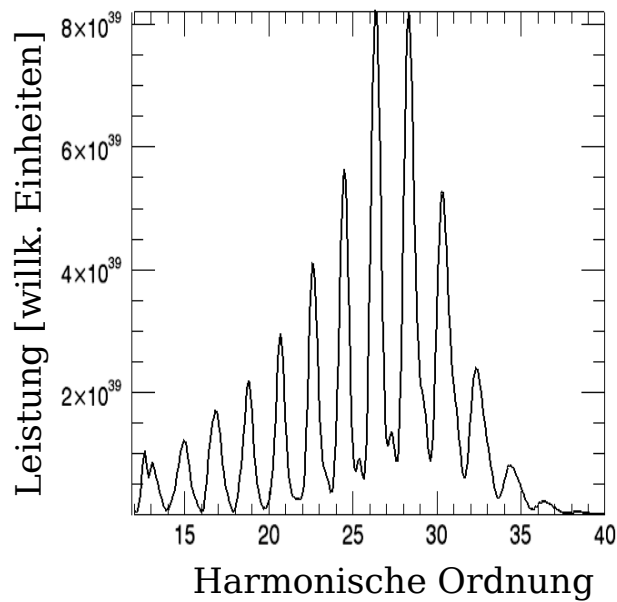


$\tau=7\text{fs}$ $I_0=7.5 \cdot 10^{14} \text{W/cm}^2$

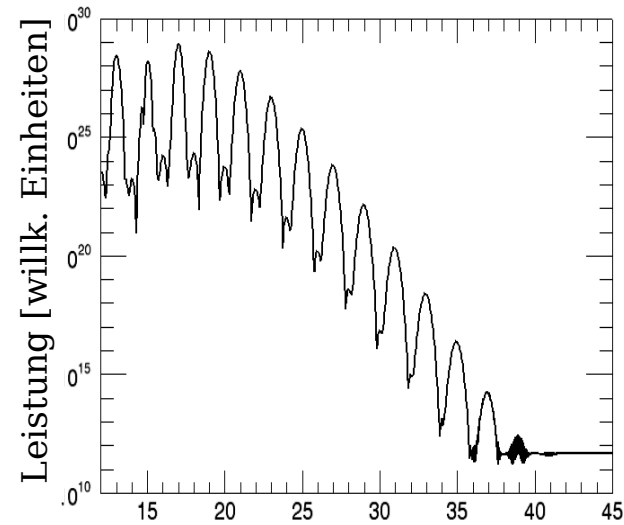


$\tau=30\text{fs}$ $I_0=7.5 \cdot 10^{14} \text{W/cm}^2$

Simulationsergebnisse – Phasen-Anpassung

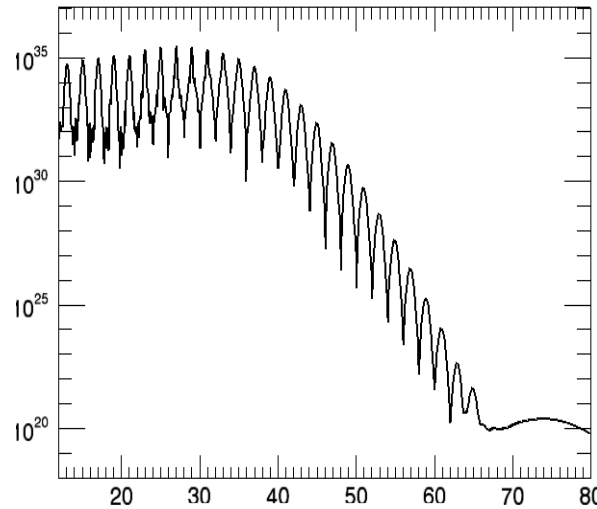


Simulationsergebnisse – Cut-off Gesetz



Harmonische Ordnung

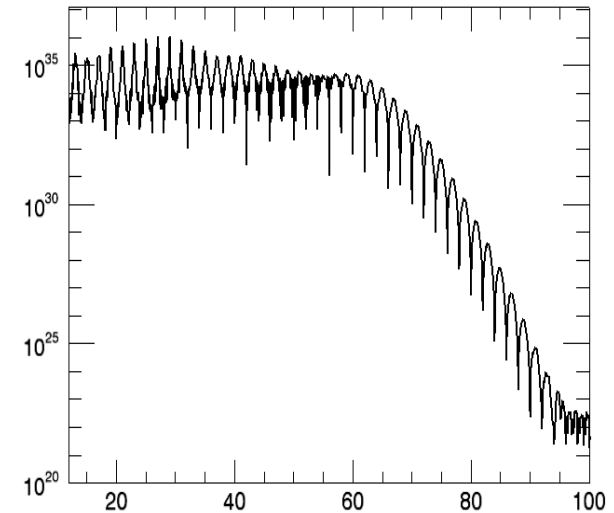
$$I_0 = 1 \cdot 10^{14} \text{ W/cm}^2$$



Harmonische Ordnung

$$I_0 = 5 \cdot 10^{14} \text{ W/cm}^2$$

Pulsdauer: $\tau = 20 \text{ fs}$



Harmonische Ordnung

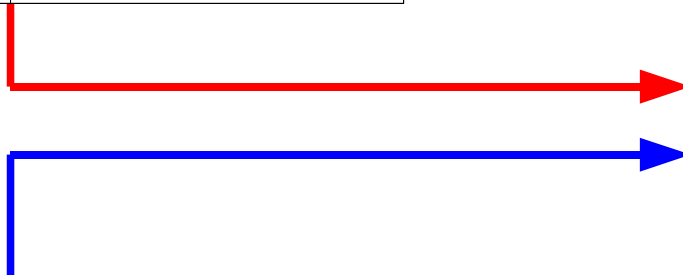
$$I_0 = 1 \cdot 10^{15} \text{ W/cm}^2$$

Intensität I_0 [W/cm^2]	Cut-off Gesetz	Simulierter Cut-off
$1 \cdot 10^{14}$	17.7	21 – 25
$5 \cdot 10^{14}$	37.1	39 – 43
$1 \cdot 10^{15}$	61.3	63 – 67



Simulation eines HHG geseedeten FELs

Simulierte Szenarien

HHG-Seed Parameter	
λ_{fund}	740 nm
I_0	$3.5 \cdot 10^{14} \text{ W/cm}^2$
τ	30 fs
z_f	- 1.5 mm



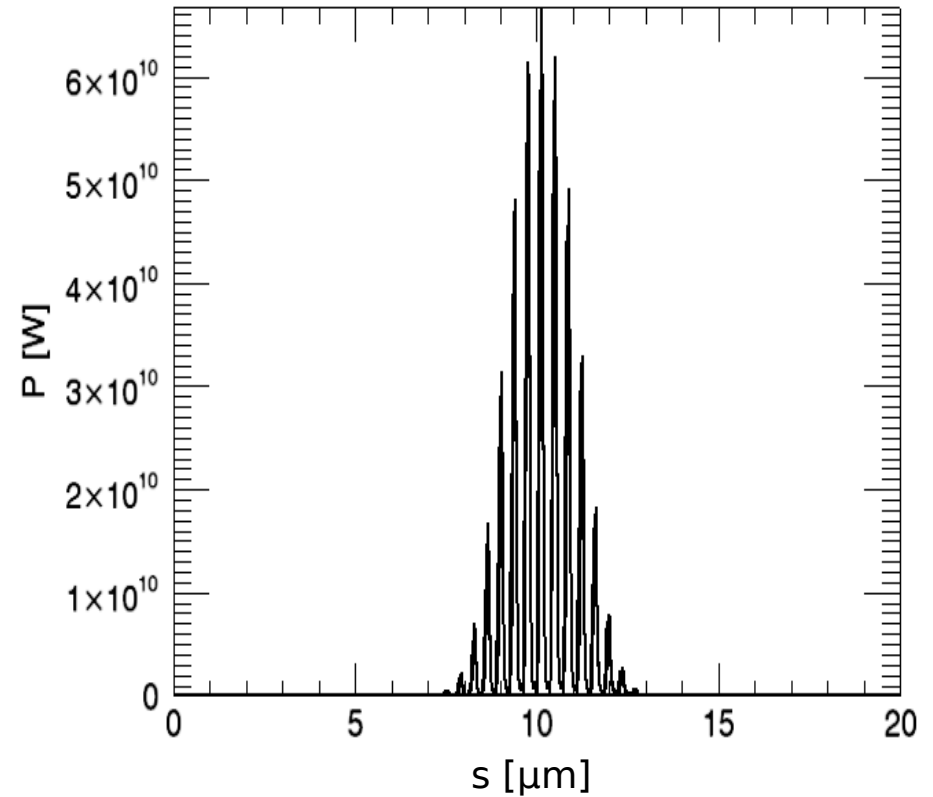
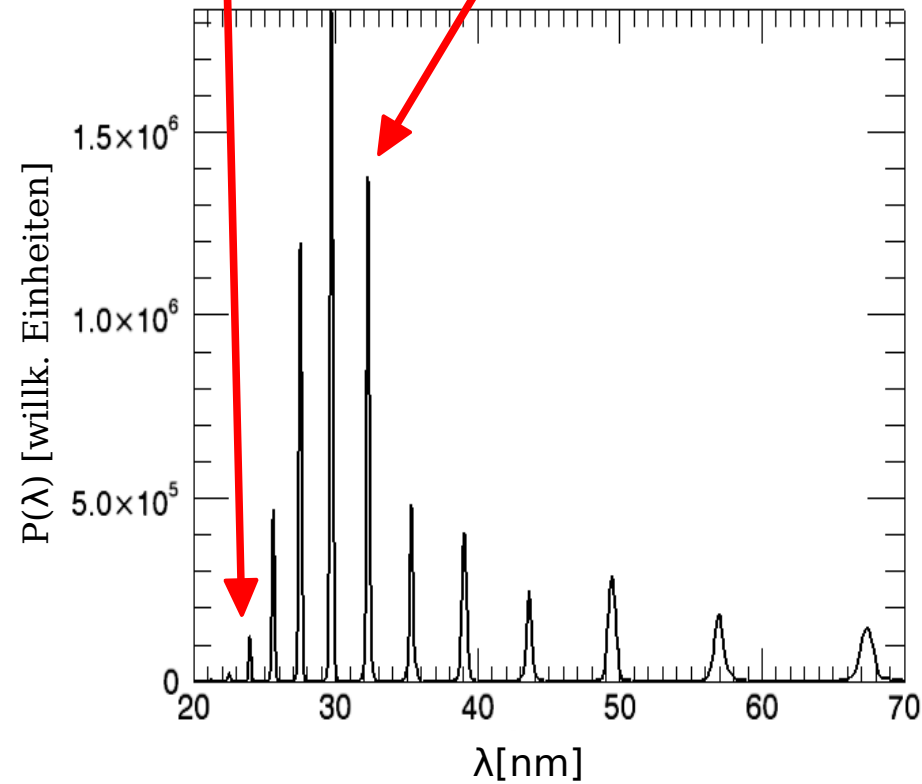
Elektronen-Strahl Parameter		
	STARS	BESSY LE-FEL
E_{beam}	325 MeV	1020 MeV
I_{peak}	500 A	1750 A

FEL-Radiator		
	STARS 2. Radiator	BESSY LE-FEL Final Amplifier
		
λ_{fel}	32.2 nm (H23)	23.9 nm (H31)
L_u	10 m	7 m

Der Seed

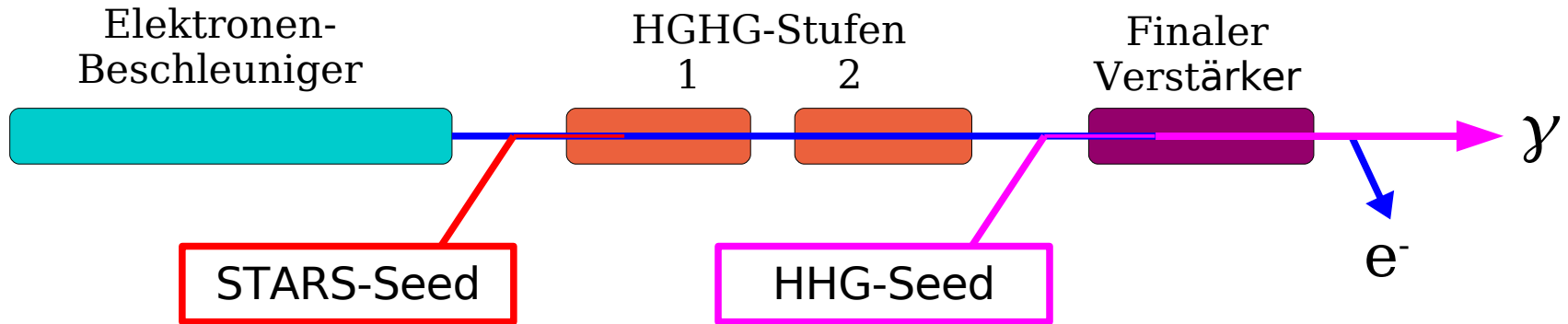
H31 – 23.9 nm

H23 – 32.2 nm



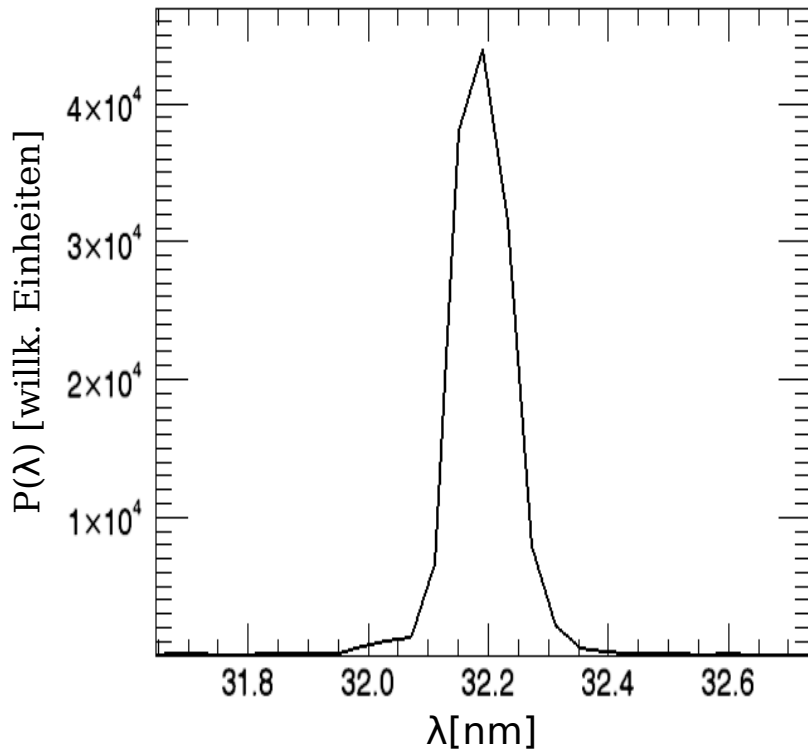
$\tau < 7$ fs

STARS – Schematischer Aufbau

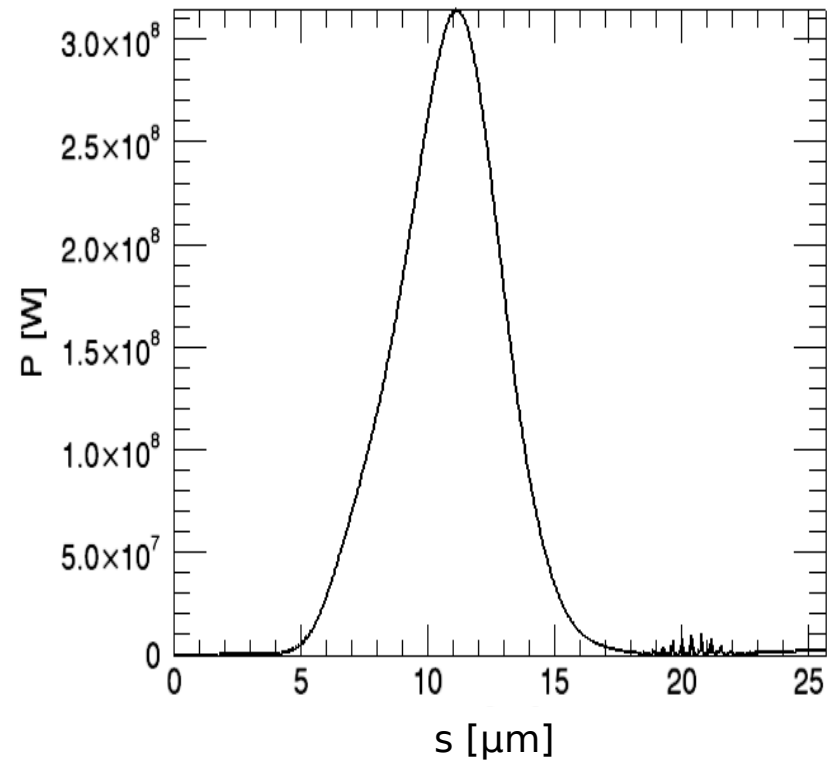


- STARS: minimale Wellenlänge von 40 nm geplant
- HHG-Seed ermöglicht:
 - kürzere Wellenlängen (simuliertes Beispiel: 32.2 nm)
 - Verzicht auf HGHHG-Stufen – nur finaler Verstärker nötig

STARS - $\lambda = 32.2 \text{ nm}$

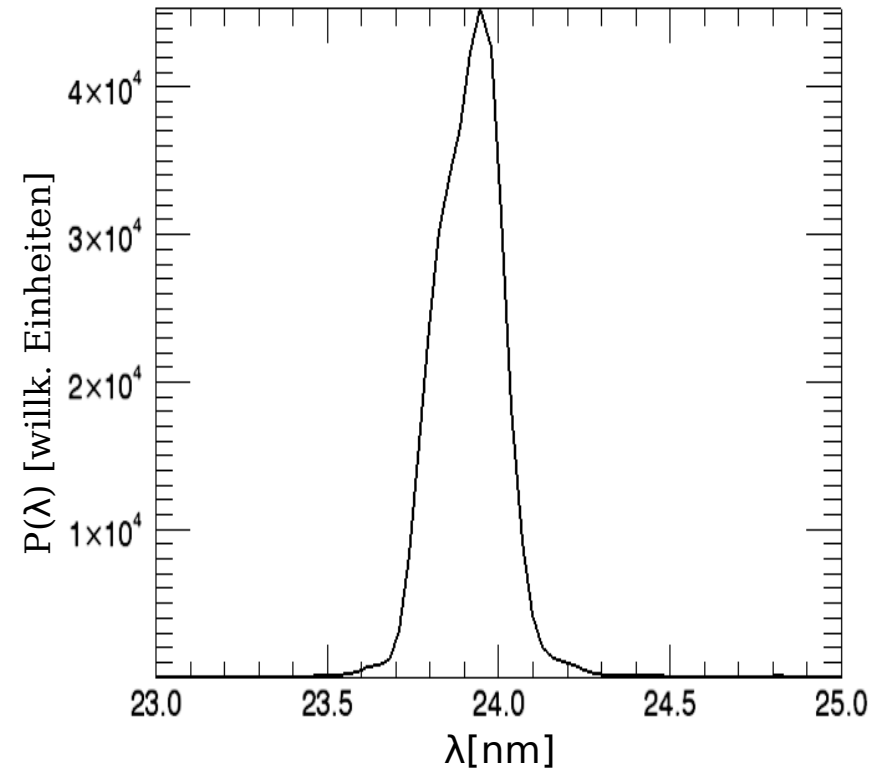
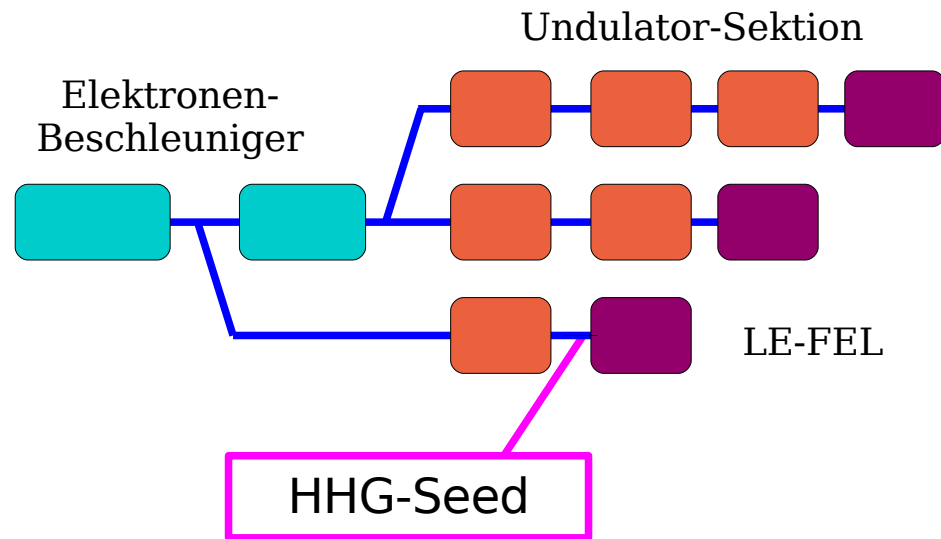


$$\Delta\lambda = 0.2 \text{ nm} \rightarrow \Delta\lambda/\lambda = 6 \cdot 10^{-3}$$



$$\tau = 17 \text{ fs}$$

BESSY LE-FEL - $\lambda = 23.9 \text{ nm}$



$$\Delta\lambda = 0.3 \text{ nm} \rightarrow \Delta\lambda/\lambda = 10^{-2}$$

Zusammenfassung

- HHG führt zur Verbesserung des FEL
 - kurzwellige, kohärente Strahlung
 - kurze Pulslängen
 - weniger Rauschen
 - kürzerer experimenteller Aufbau
- HHG Simulationstool RHYNO
 - reproduziert wesentliche Aspekte der HHG-Spektren
 - geeignet zur Berechnung des Seeds für FEL-Simulationen
- HHG seeded FELs wurden simuliert
 - > Vielversprechende Simulations-Ergebnisse motivieren eine weitergehende Untersuchung dieses Konzeptes

Ausblick

- Vergleich der Ergebnisse von RHYNO mit realem Experiment
- weitere Simulationen von HHG seeded FELs
- Aufbau eines HHG seeded FELs
(erste Beispiele: Spring8, Japan / LCLS, Stanford, USA)

**Vielen Dank
für Ihre
Aufmerksamkeit!**