

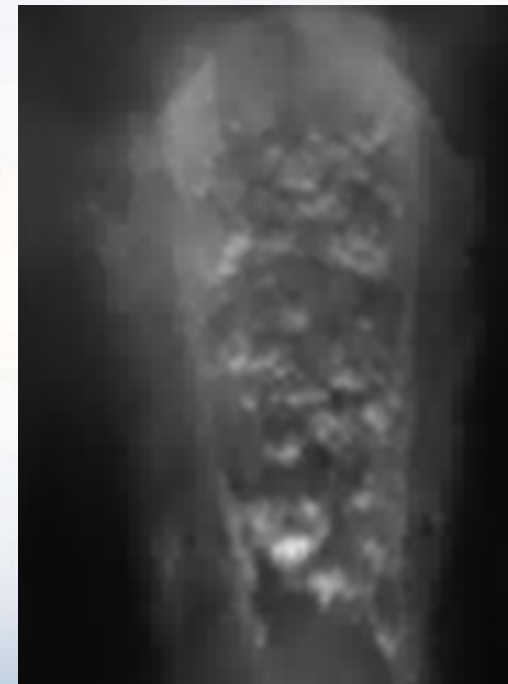
Fiberlaser: strålkarakterisering, nyckelhål och svetsprestanda

Alexander Kaplan

Luleå tekniska universitet

Fiberlaser:

- Fokuserad fiber-guidad laserstråle
- Djupa svetsningar
- Nyckelhål, filmat
- Nyckelhål, beräknat



Nyckelhålets yta

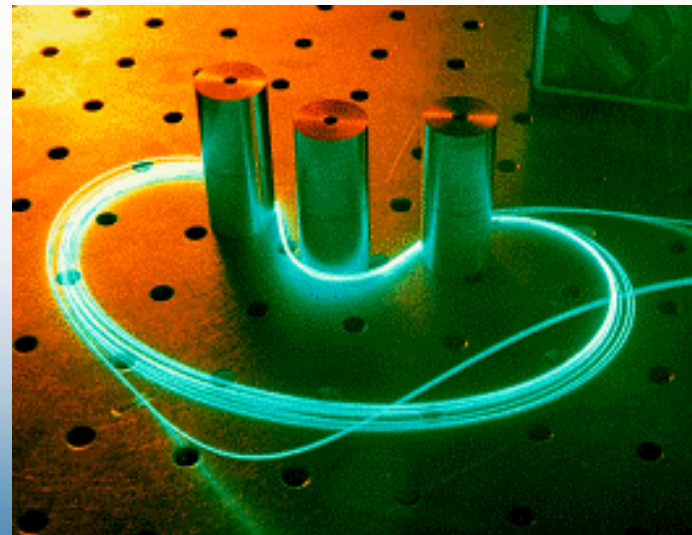
Högeffektlaserkällor - skillnader

Vi skiljer på

- fokuserad laserstråle (verktyget) → påverkar processen
- kostnader (investering, drift/underhåll, livslängd)
- praktiska aspekter (strålhantering, säkerhet, mm)

Här: endast 'verktyg':

- strålprofil
- fokusering
- absorption
- (max. effekt)

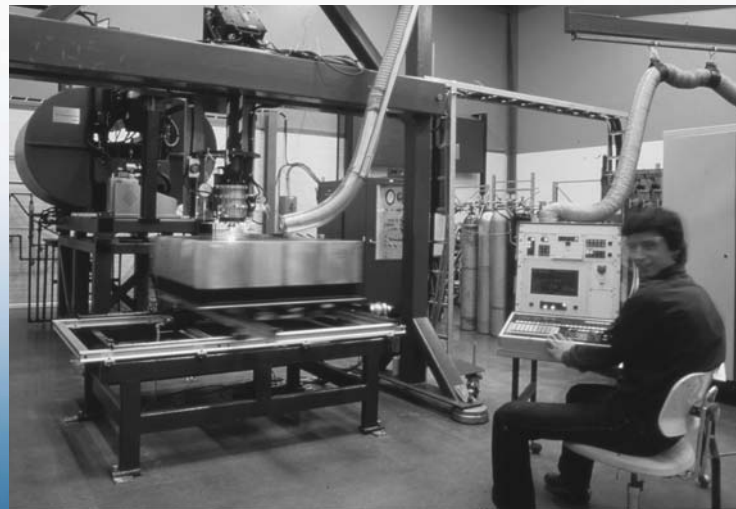


Högeffektlaserkällor

<u>Lasertyp</u>	<u>Våglängd</u>	<u>Huvudnackdelar</u>
■ CO ₂ -laser	10,64 µm	gashantering, ingen fiber
■ Nd:YAG stavlaser	1064 nm	< 4 kW, fokus, pris, drift
■ YAG diskaser	1030 nm++	pris
■ Yb:fiberlaser	1070 nm++	pris
■ Diodlaser	808-980 nm	begränsad fokusering

Våglängden påverkar:

- fokuserbarhet
- absorption på ytan
- ång/plasma-växelvekan



*1979: Första
CO₂-laser
på LTU,
Greger Wiklund*



April 2008



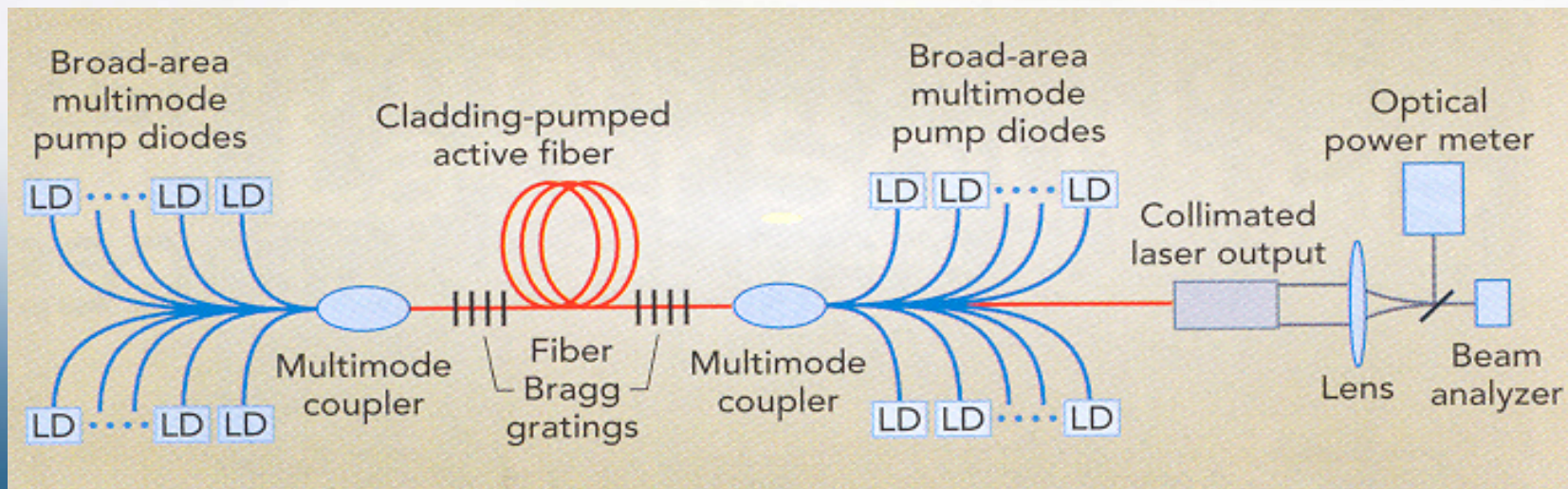
15 kW Yb:fiberlaser

26 orange 35 μm -fibrar
som moduler med 600 W

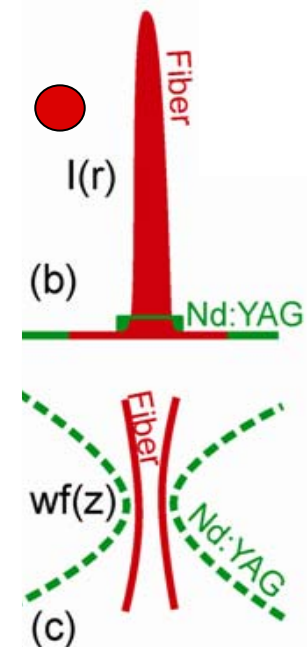
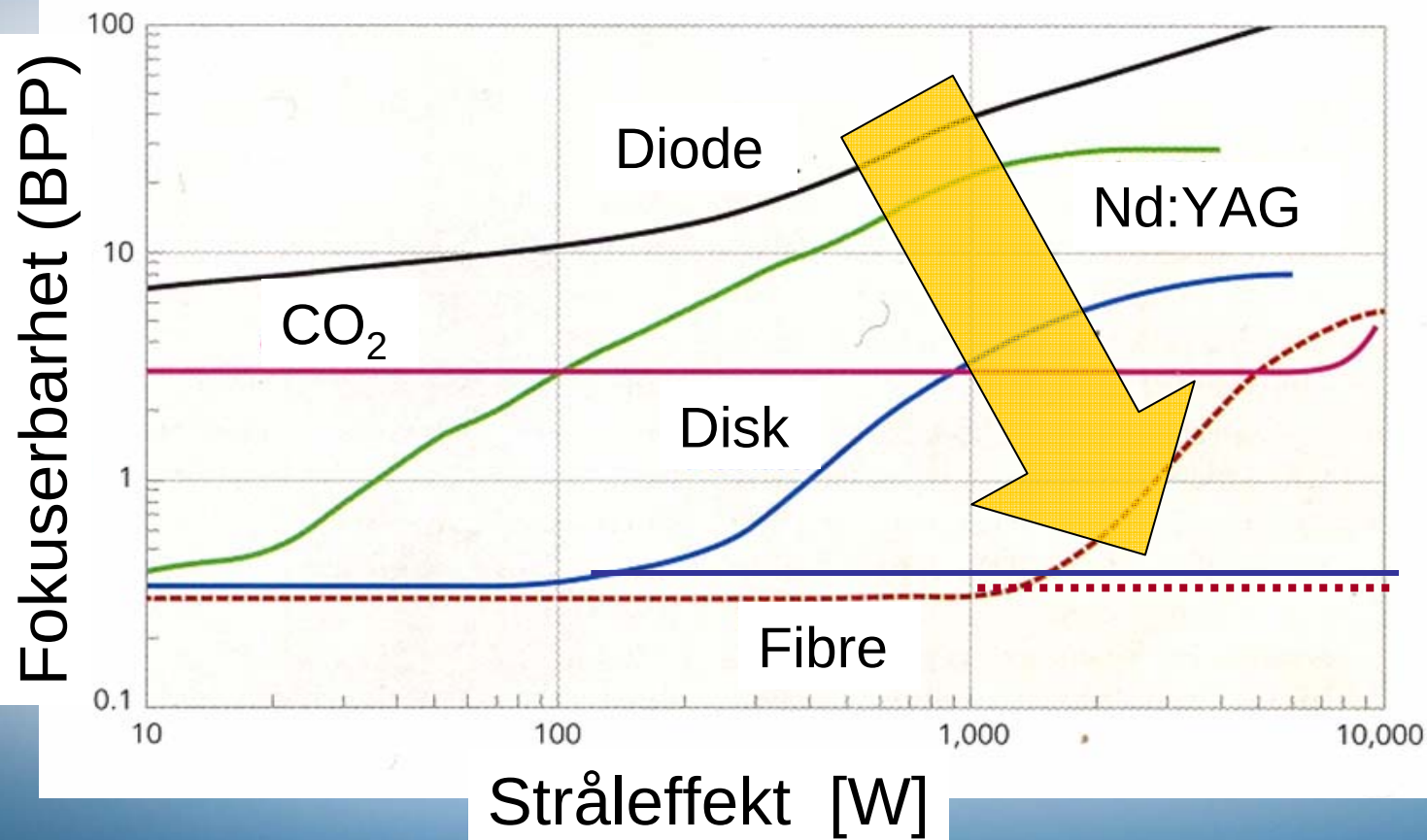


15 kW fiberlaser

- 15 kW Yb:fiberlaser, 1070 nm, fiberdiameter: 200 μm
- BPP=10.4 mm·mrad (<12) , $K=0.033$, $I < 50 \text{ MW/cm}^2$
- Puls: $< 5 \text{ kHz}$, $> 20 \mu\text{s}$
- Pris: 1 M€; wall plug efficiency $< 30\%$
- Storlek (inkl. el., exkl. kylare) 1500 x 800 x 1500 mm, 1 t

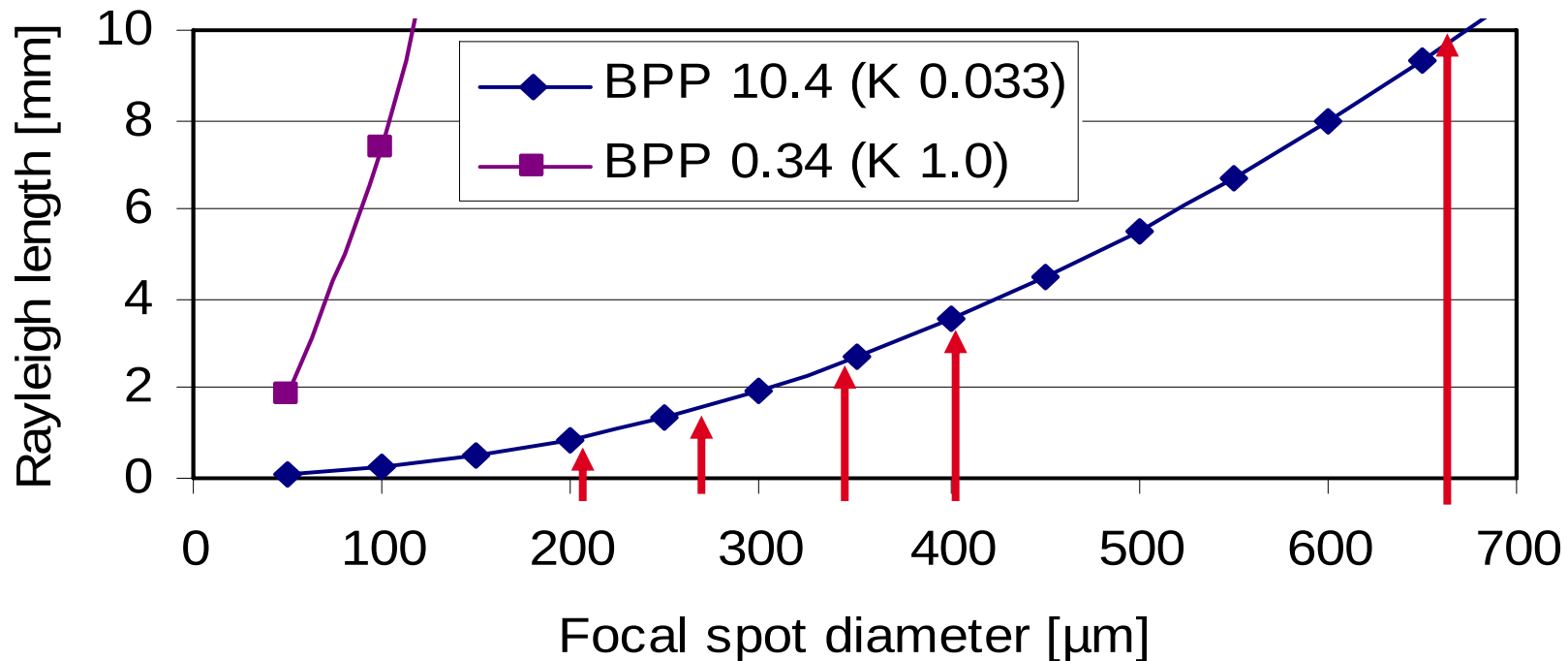


Strålparameterprodukt vs. effekt



15 kW: 5 optiker → 5 fokuseringsval

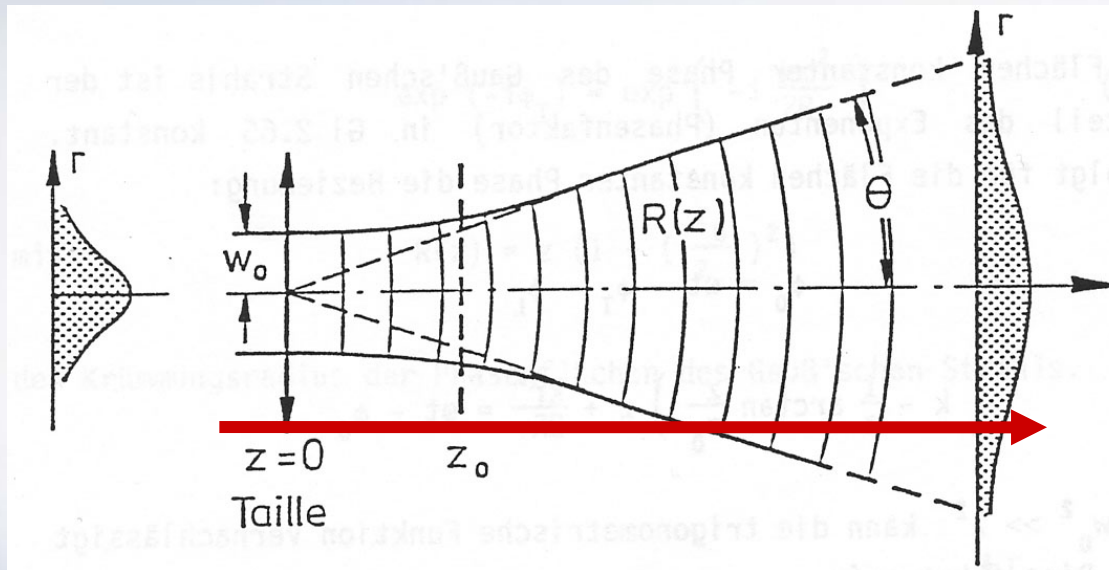
5 optiker: kompromiss fokaldjupet vs. spotdiameter



Fokuserad Gauss-stråle, karakterisering

- Gauss-strål (t ex CO₂)

» Fokusdiameter w_0 , fokaldjupet z_R (Rayleigh längd), spetseffektthet I_0

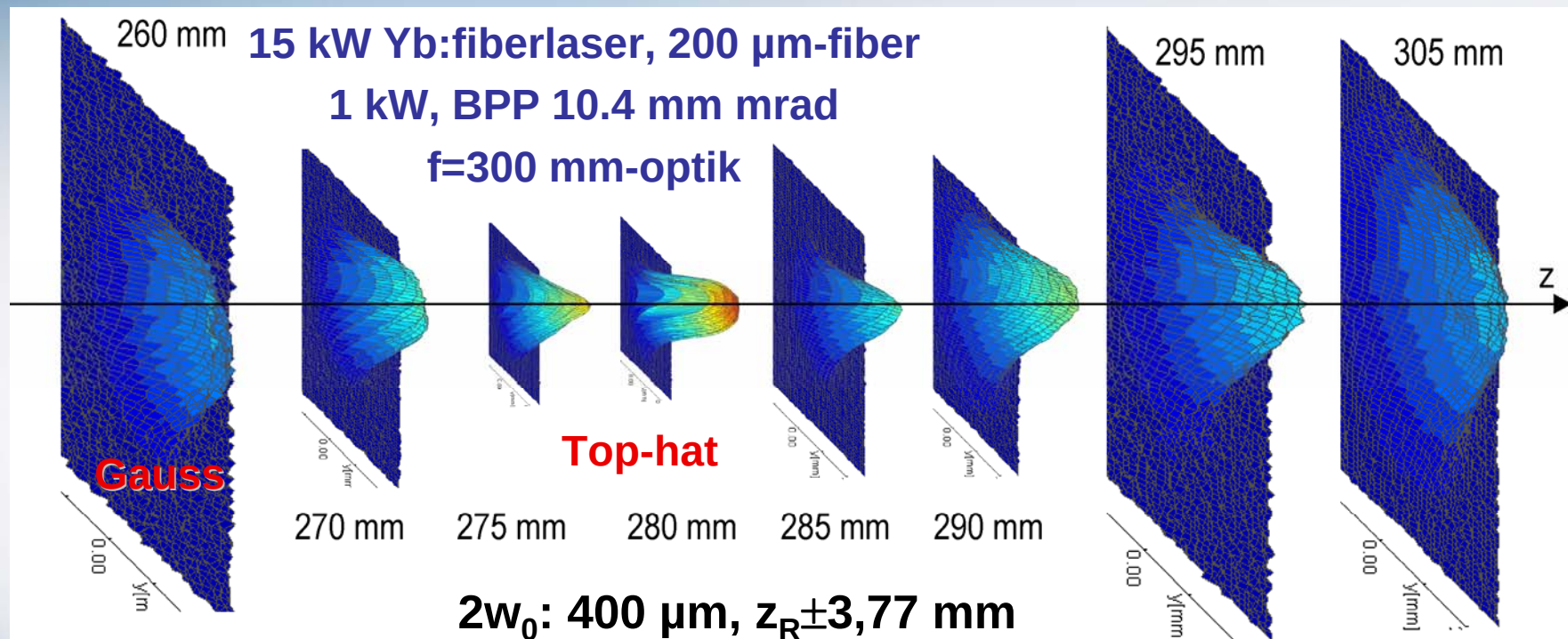


- Högeffektlaser: ~Gauss
- Hela z-vägen Gauss
- Fast relation $z_R \sim w_0^2$

$$I(r, z) = I_0 \exp(-2r^2 / w^2)$$

$$w(z) = w_0 \left(1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2 \right)^{1/2}$$

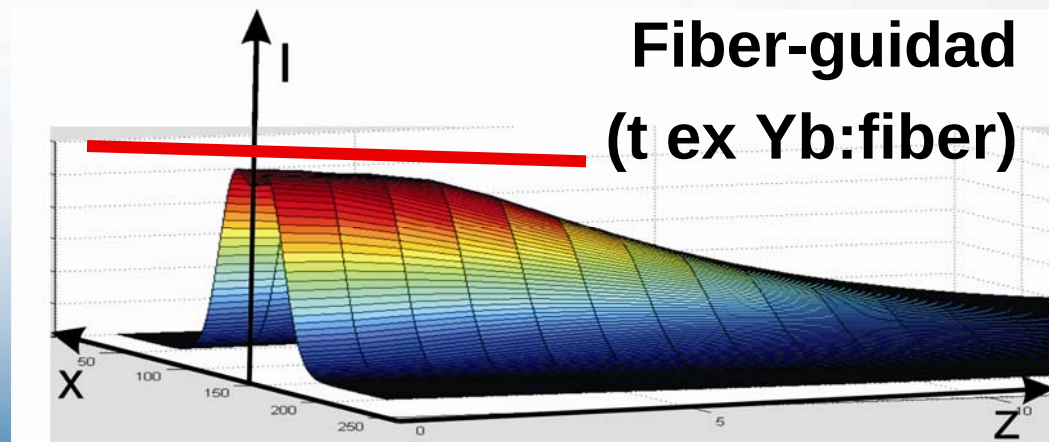
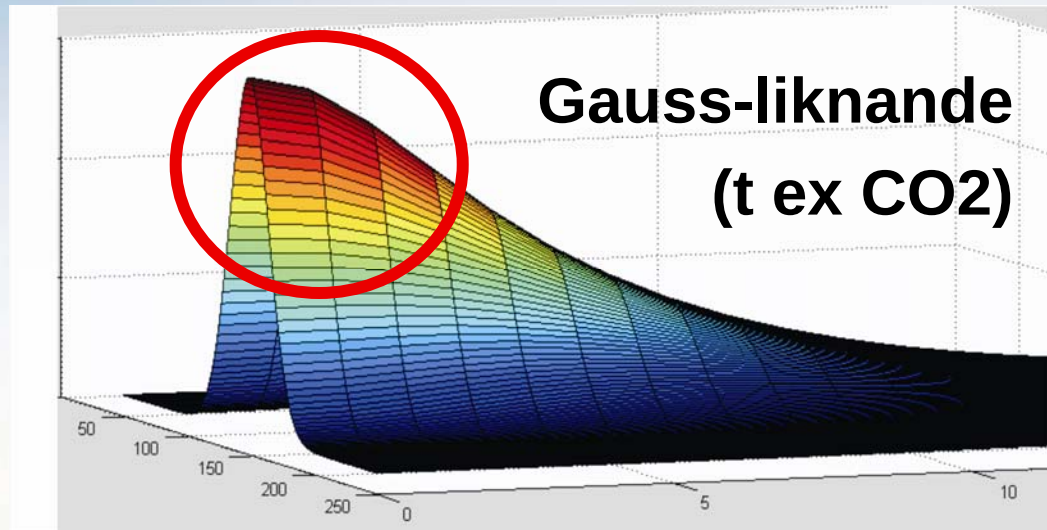
Fiberledd laserstråle, fokuserad



- » i fokus top-hat (rektangulär) profil, halv effekttäthet
- » fiberändan projiceras (förstoring $M=f/k$ genom optik f,k) till fokus
- » väldefinierad genom fiberdiameter w_f : $w_0=w_f \cdot M$

Fokuserad: Effekttäthetsfördelning

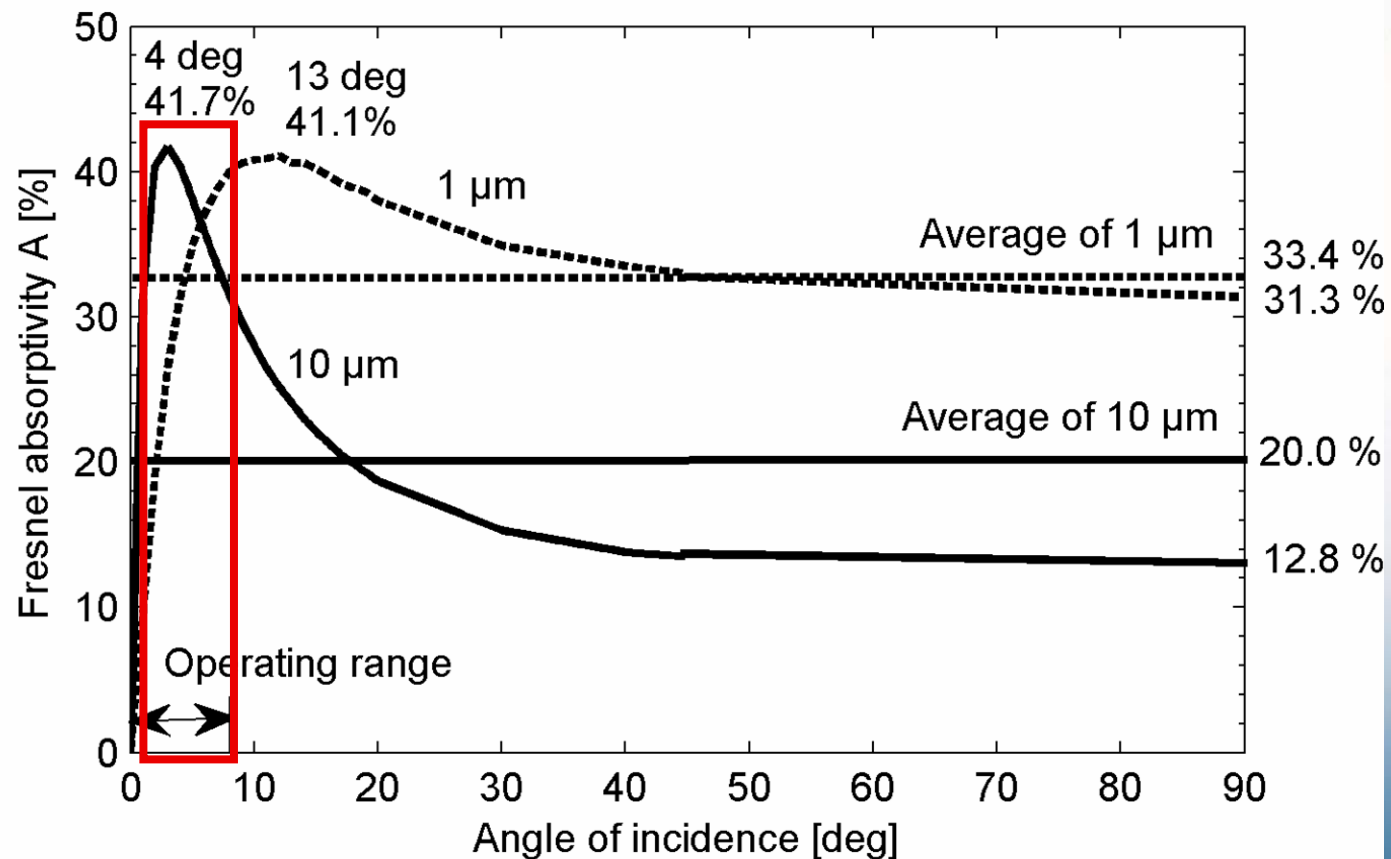
- Frilöpade laserstråle,
t ex 10 μm CO₂-laser
 - Tydligt spets
 - Högre effekttäthet för
samma fokaldjupet
 - Gauss: 3 parameter
-
- Fiber-guidad laser,
1 μm , t ex YAG-,
disk- eller fiberlaser
 - Homogen i centrum
 - Modell: 6 parameter



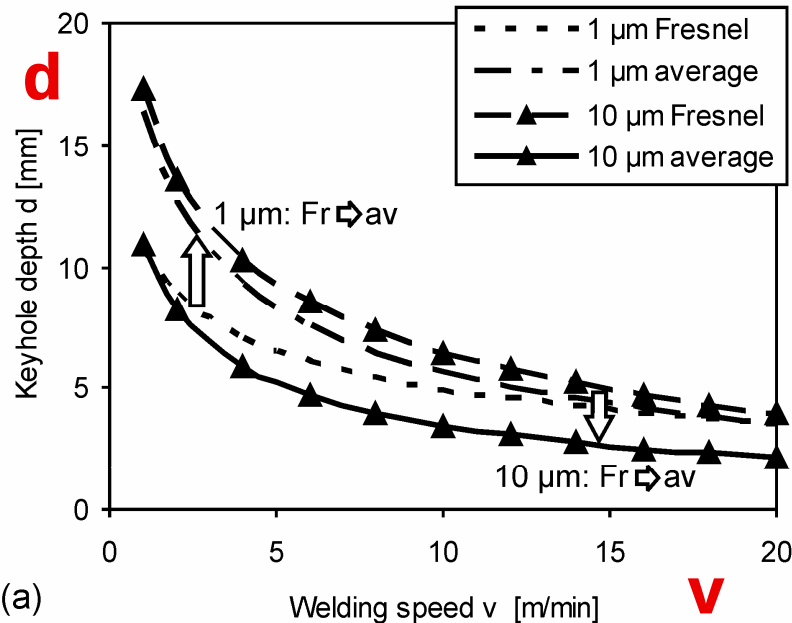
Absorption = f(infallsvinkel, våglängd)

- Svetsning, skärning i snävt vinkelfönster (90°=normal till ytan)

**1 μm
vs.
10 μm**



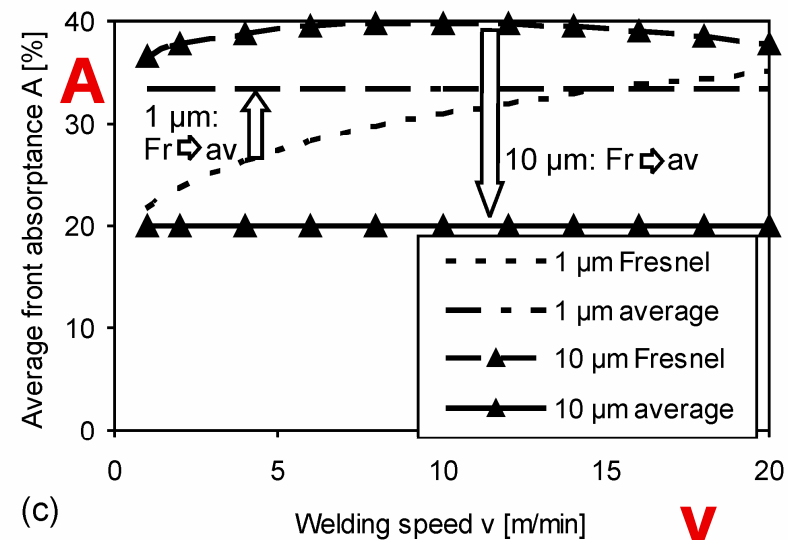
Svetsdjupet beräknat för 1 μm vs 10 μm våglängd, smooth vs. rough nyckelhål



- 1 μm : $\sim$ linear A-increase
- 10 μm : high A, Brewster-peak
- Averaging surface: opposite

Om direktabsorption bara betraktas:

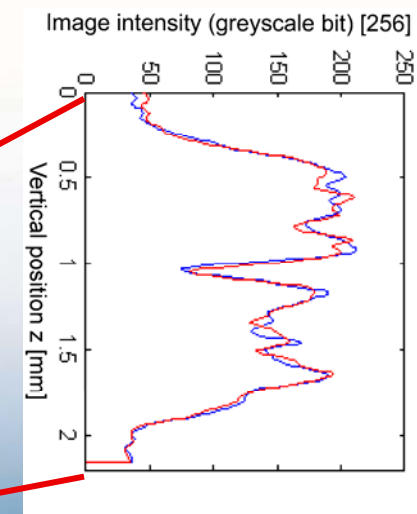
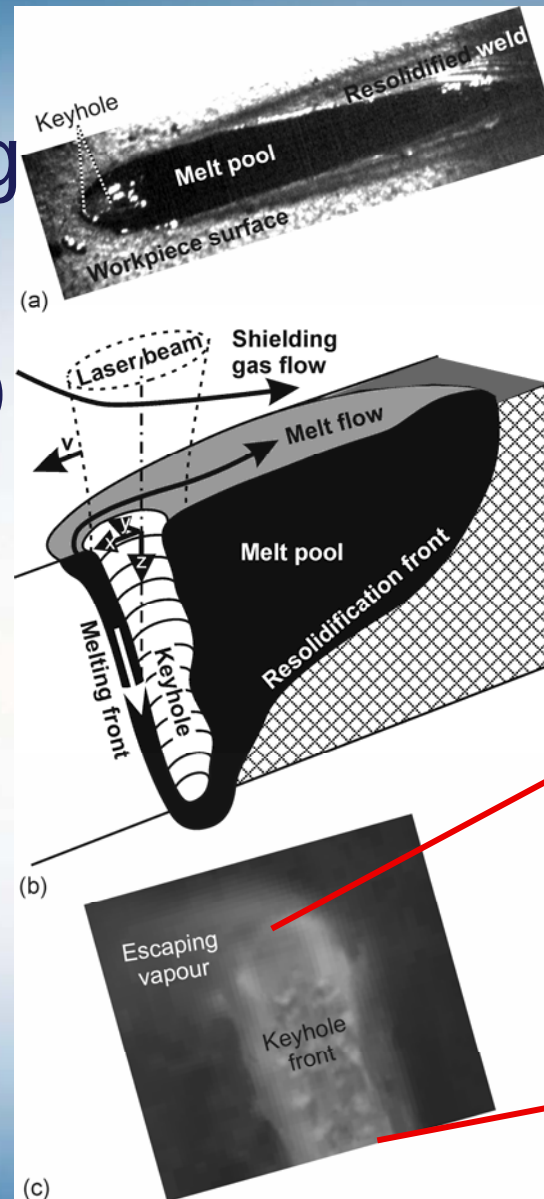
- 10 μm absorberar bättre
- Men är den vågig: $A(10 \mu\text{m}) \downarrow$



Nyckelhål i lasersvetsning

Höghastighetsfilmning:
(Ingemar Eriksson, 2010)

- Ytan av nyckelhålfront blev synlig för första gången
- Gråskala ~ytprofil? T?
- Vågor på ytan som flödar ner
- Hastighet 1-10 m/s



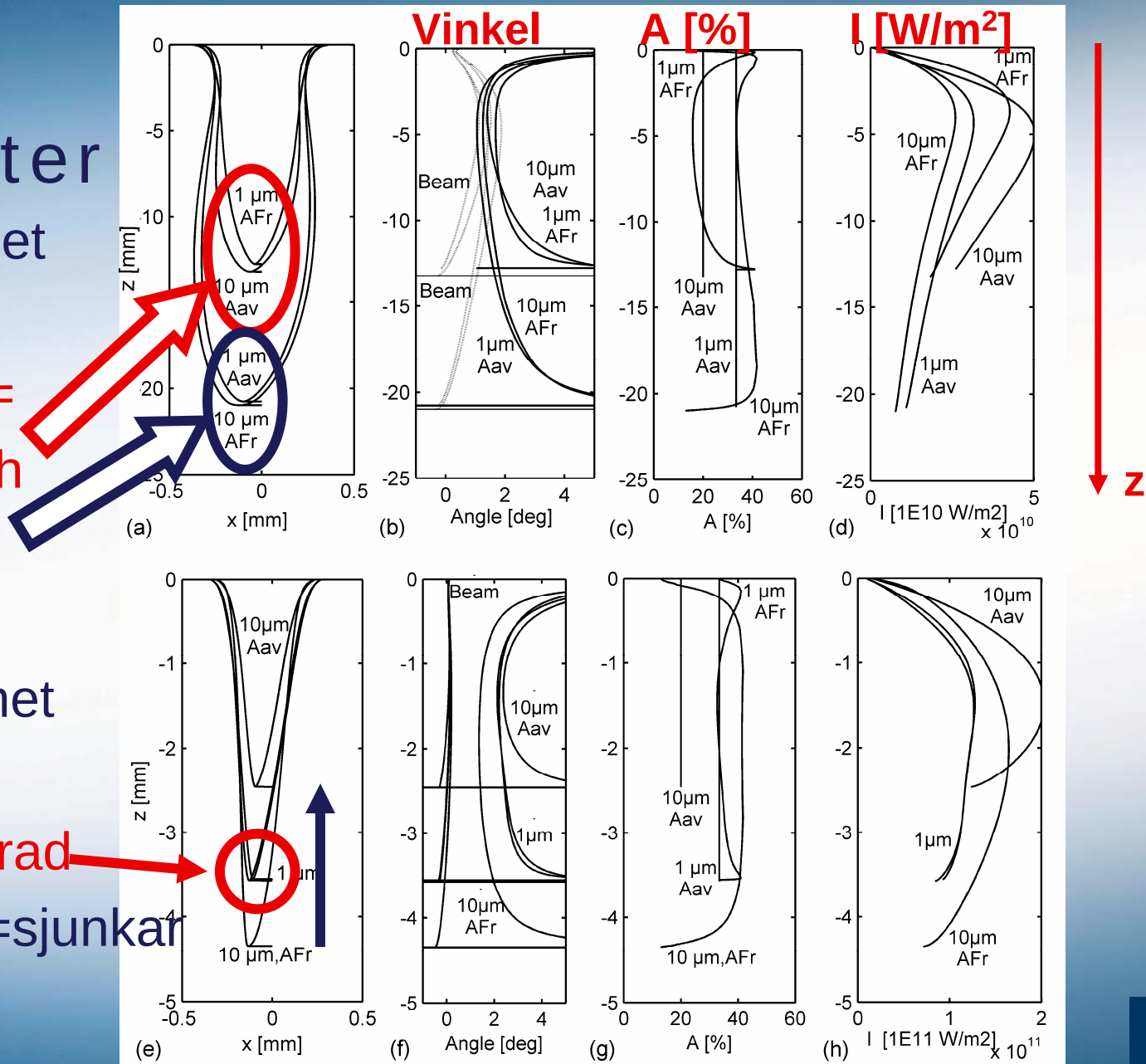
2 svets- hastigheter

- Låg hastighet
0.5 m/min

10 μm -rough =
= 1 μm -smooth
och tvärtom

- Hög hastighet
20 m/min

1 μm : oförändrad
10 μm : rough=sjunkar



Exempelfilm nyckelhålsfront

Perspektiv bakifrån smältan

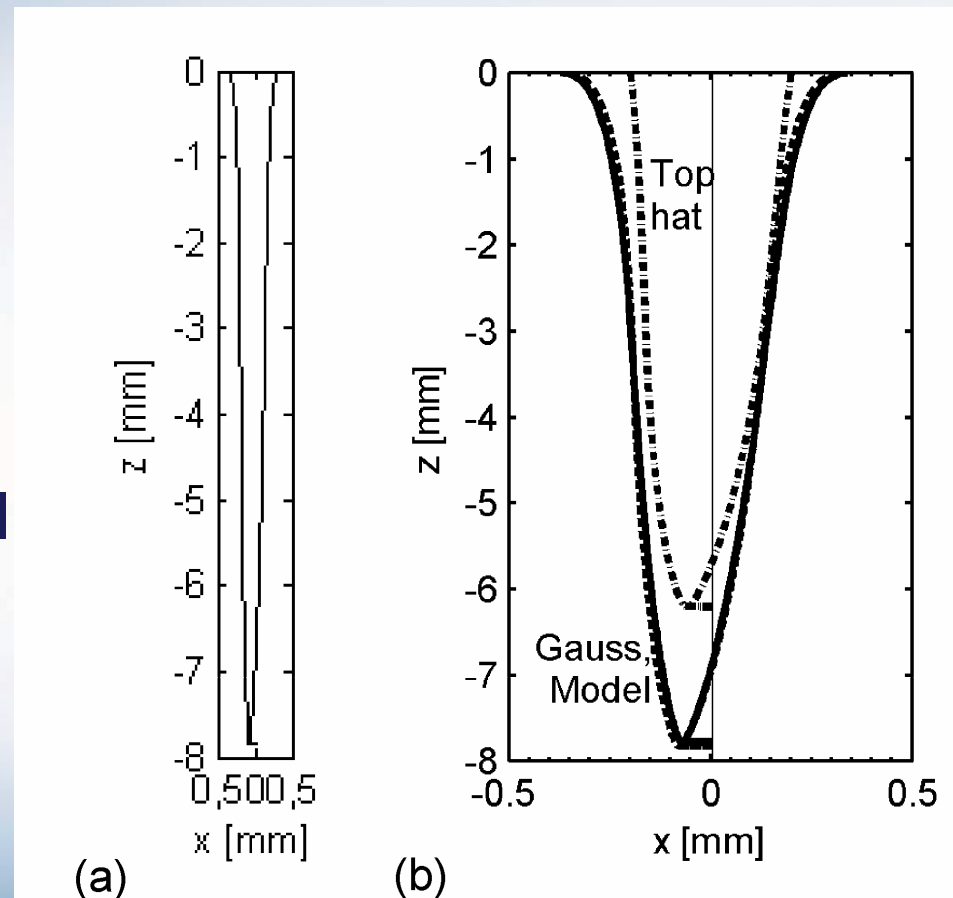
15 kW, 6 m/min

15 kW, 15 m/min



Modellberäkning av nyckelhålet: Jämförelse Top-hat, Gauss, fibre-guid.

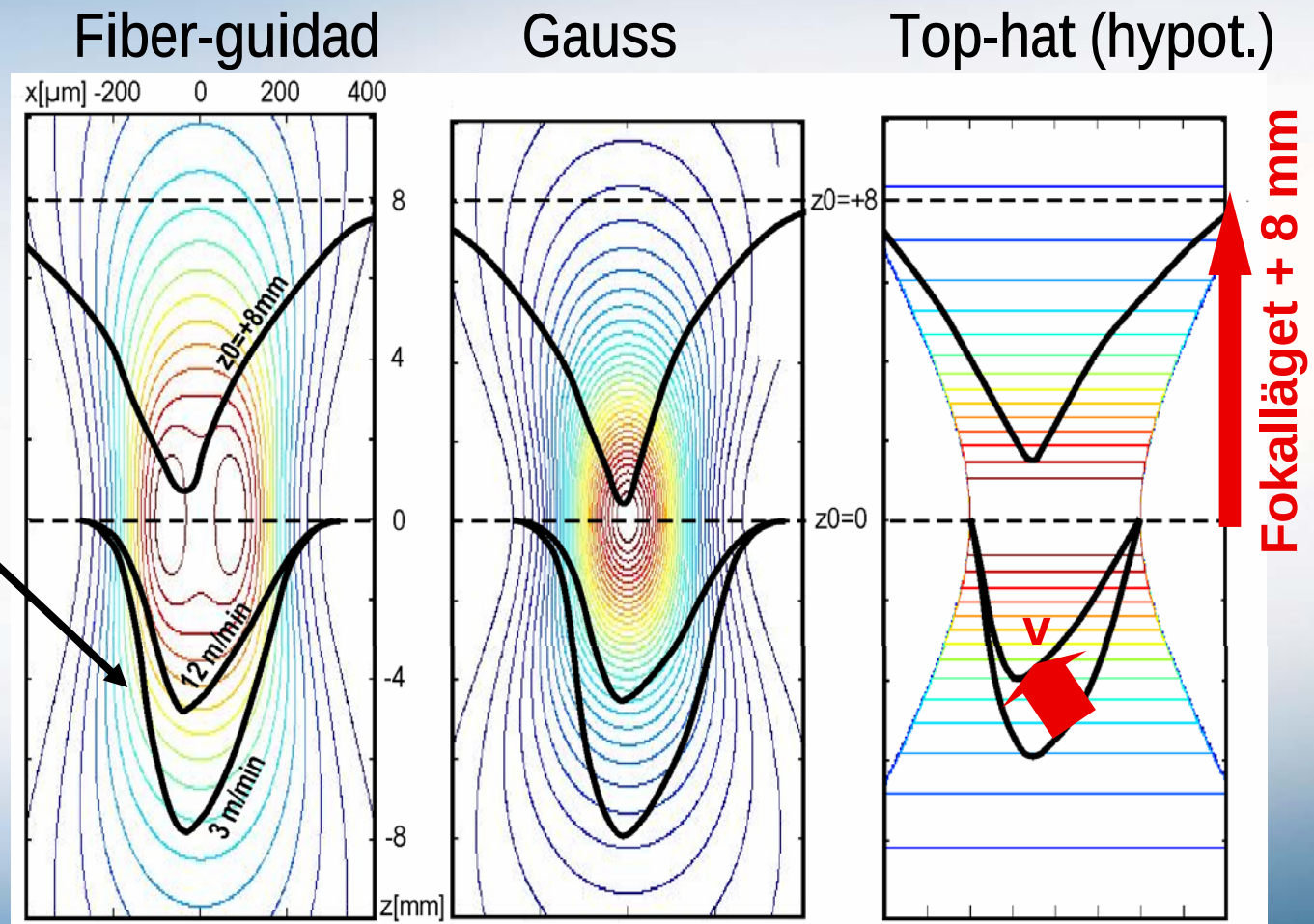
- Hypotetisk ren top-hat-stråle: skarp, väldefinierat nyckelhål
- Gauss vs. fibre-guided: nästan samma nyckelhål
- Varför? Trots stor skillnad i laserstråle!?



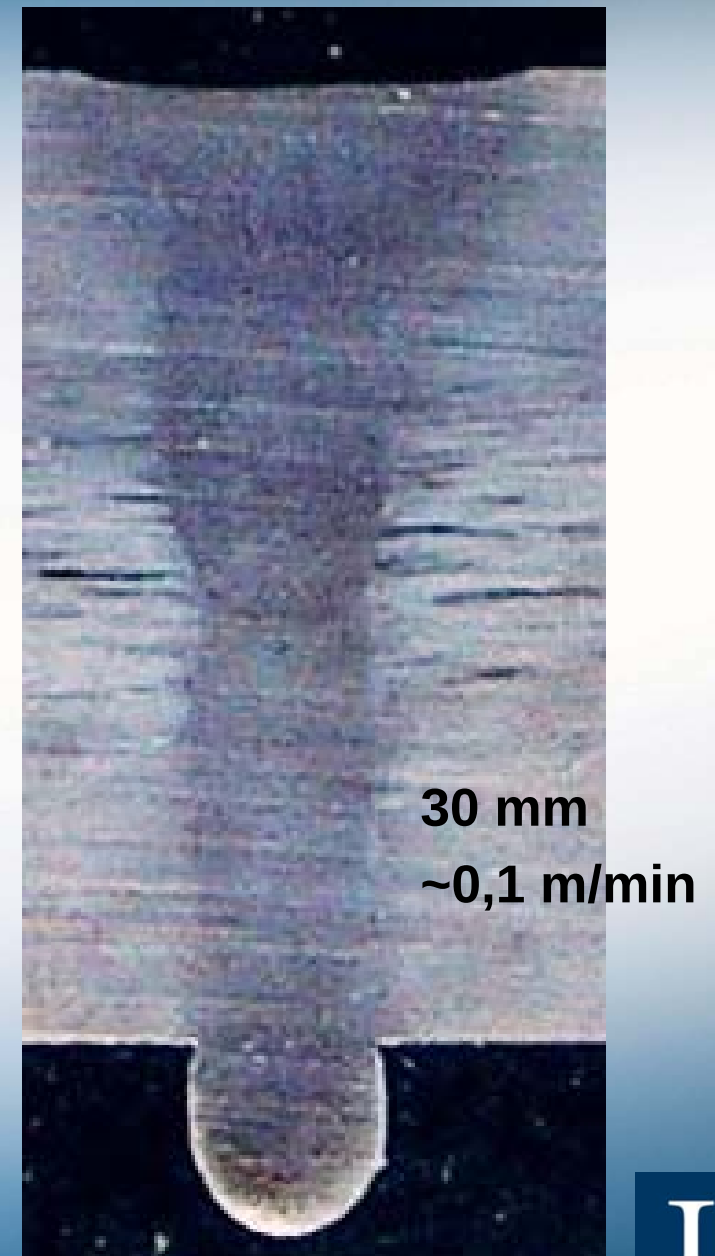
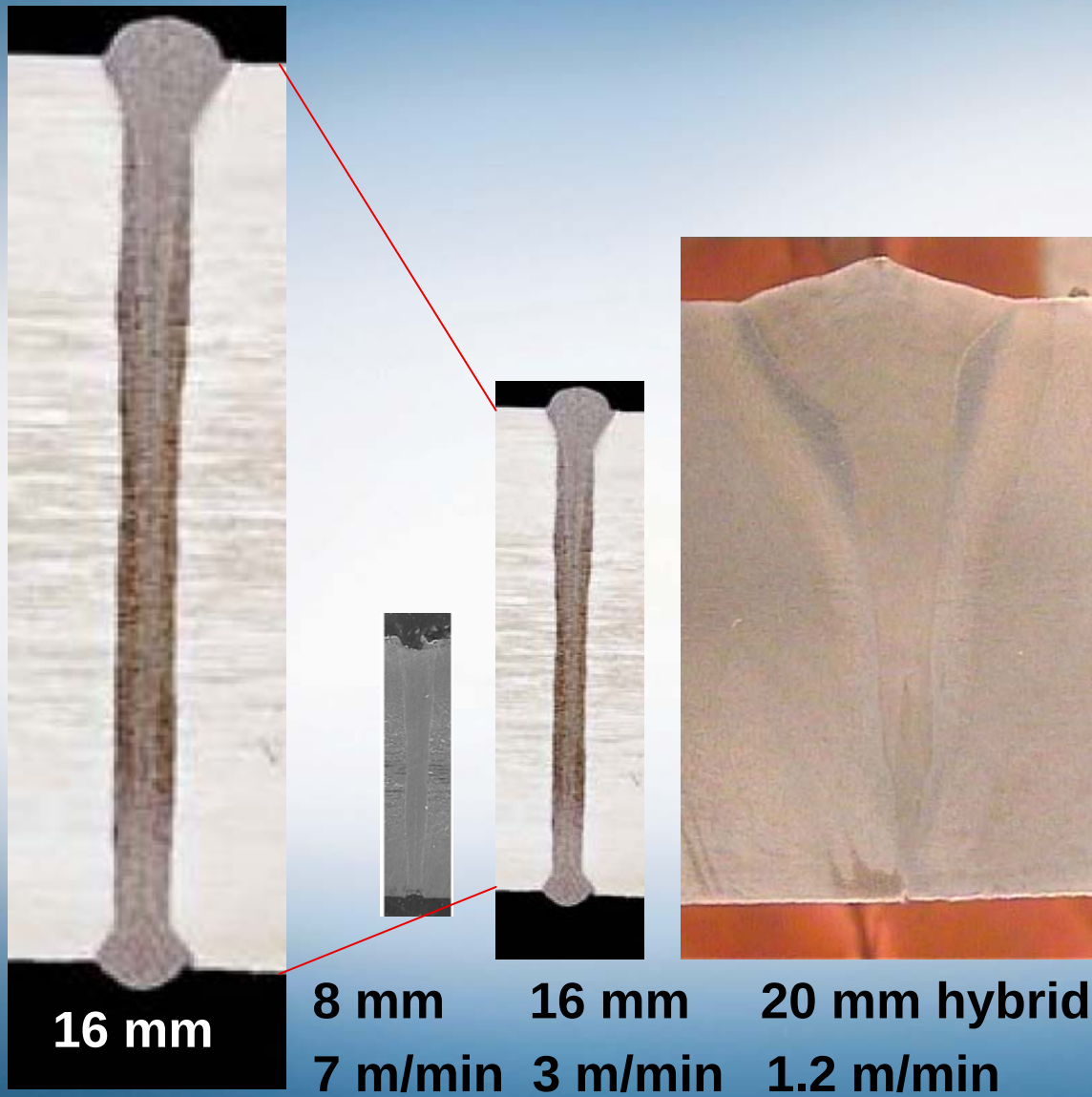
“Verktyg” och resulterande nyckelhål

Endast
strålperiferin
skapar
nyckelhålet

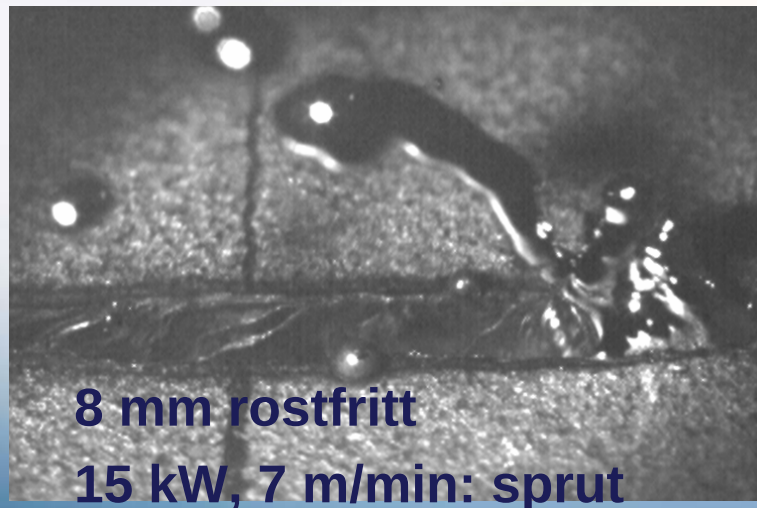
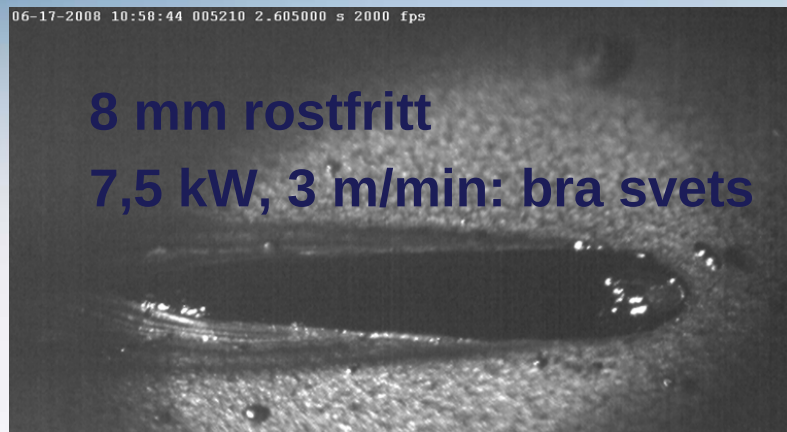
Skillnad i
strålcentrum
spelar ingen roll



15 kW-lasersvetsning



Svetskvalitet – trender 1 μ m-lasrar



Trender 1 μ m-lasrar

- Sprut sannolikt
- Lång smältpöl
- Mindre effekttäthet – mer stabil
- Roten: sprut eller root-dropout
- Metallång: rörig stråldiffraktion

Slutsatser

- Fiber-guidad 1 μm -laserstrål ser i fokus annorlunda ut än 10 μm -Gauss-strål – ingen skillnad mellan fiber- eller disk-laser
- Nyckelhål oftast bara skapat genom perifer strålregioner, dvs skillnader av strålprofilen i centrum spelar mindre roll
- Nyckelhålsytan visar vågor som flöder ner
- Den vågiga nyckelhålsytan minskar den direkta absorptionen för 10 μm -lasrar (40% $\rightarrow$ 20%), men ökar för 1 μm -lasrar
- Prestanda 15 kW t ex d=8 mm/v=7 m/min, d 16/v 3, d 30
- Trend till vissa kvalitetsbrister, t ex sprut, instabilitet
- Svetsning med hög hastighet < 100 m/min undersöks snart

