

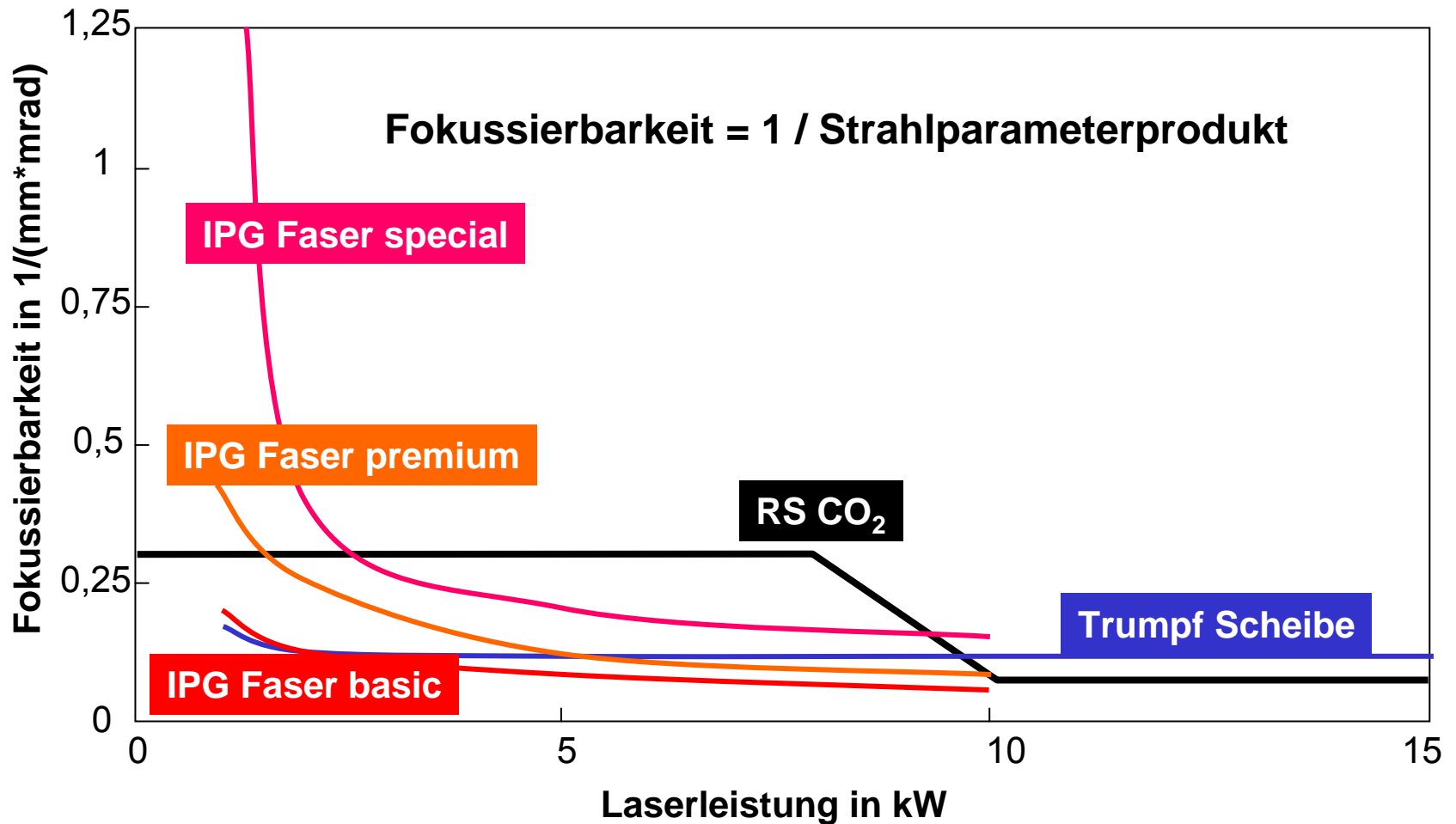
Nutzen und Grenzen starker Fokussierung für die Steigerung der Schweißtiefe

F. Dausinger

Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) und
Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge (FGSW mbH)
Stuttgart Laser Technologies

- Einführung
- Tiefschweißen mit niedrigem Aspektverhältnis
- Tiefschweißen mit hohem Aspektverhältnis
 - Einfluss Fokusbereich auf Nahttiefe
 - Beeinflussung der Querschnittsfläche
 - Einfluss der Divergenz
 - Einfluss Laserleistung
 - Nahtqualität
- Zusammenfassung

Fokussierbarkeit von Hochleistungslasern



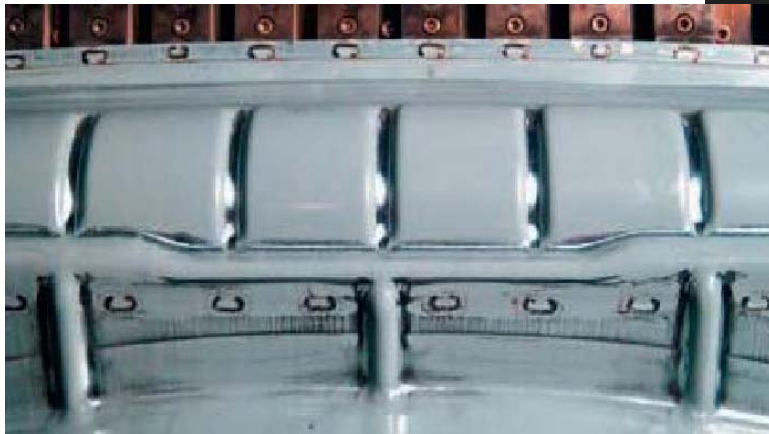
Quelle Faser basic, premium, special: IPG Homepage 06/06

Quelle Scheibe: Trumpf Homepage 06/06

Robscan

Nutzung stärkerer
Fokussierbarkeit für
schnellen
Strahltransport mit
Scanner

**5 bis 6 mal schneller
als Widerstands-
Punktschweißen**



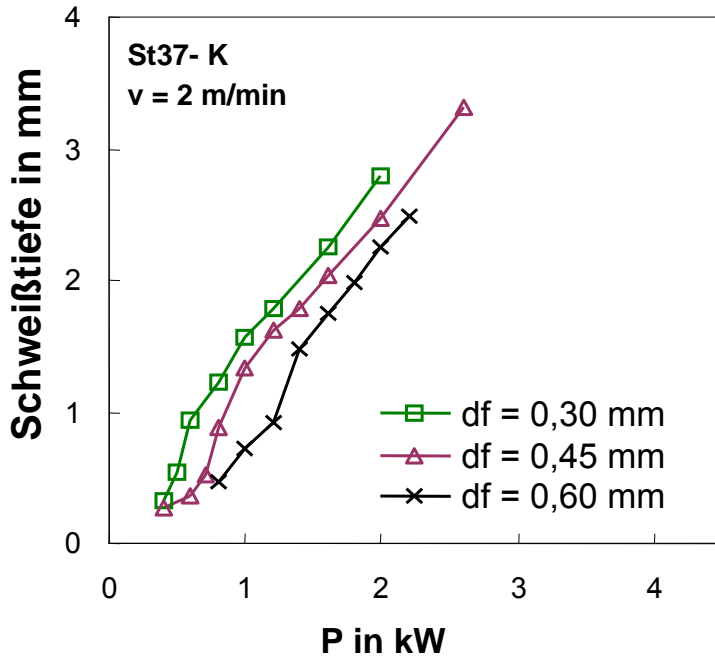
DAIMLERCHRYSLER

...FGSW...

Einfluß der Fokussierung auf die Einschweißtiefe

niedrige Pe-Zahl

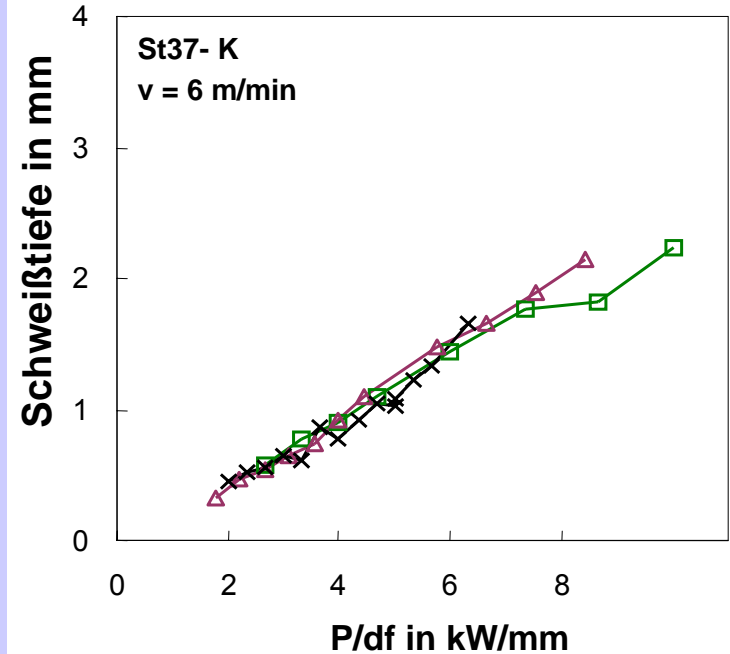
(niedrige Geschwindigkeit,
hohe Temperaturleitfähigkeit)



Tiefe ~ P

hohe Pe-Zahl

(hohe Geschwindigkeit,
niedrige Temperaturleitfähigkeit)



Tiefe ~ P/d_f

Scheibenlaser

Leistung [kW]	Faserkerndurchm. [μm]	SPP [mm*mrad]
1.5	150	6
3	150	6
6	200	8

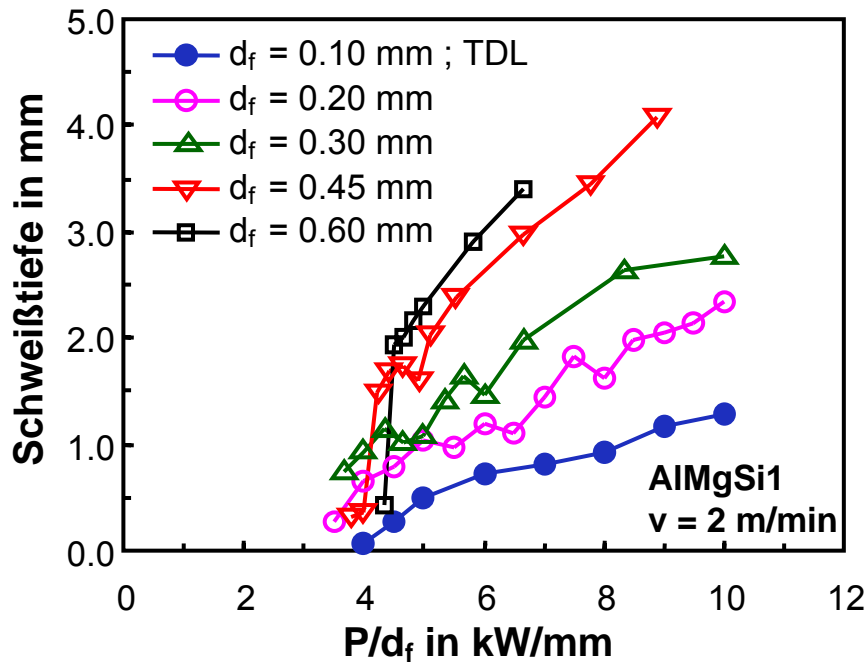
Faserlaser (IWS)

Leistung [kW]	Faserkerndurchm. [μm]	SPP [mm*mrad]
4	50	2.5

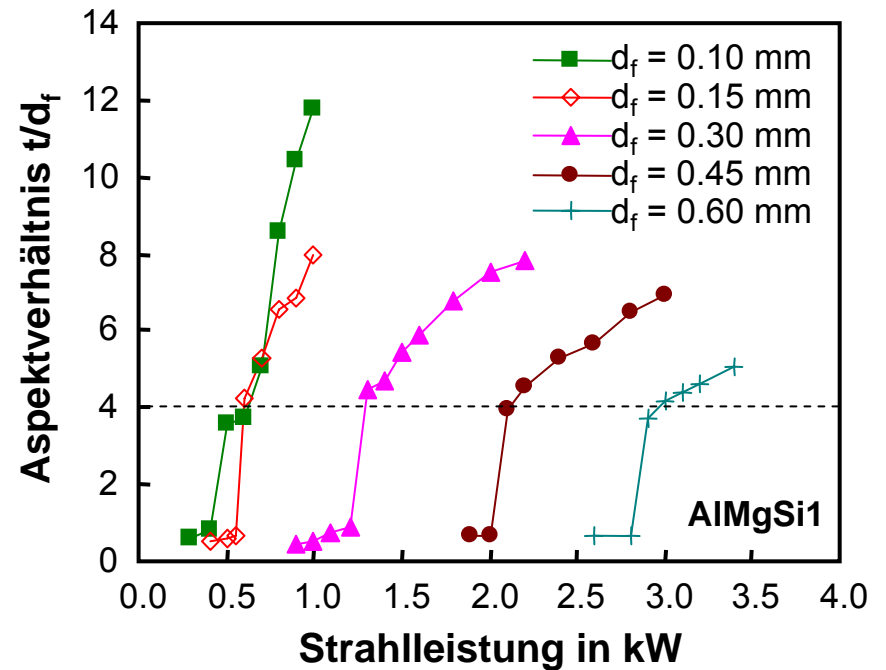
- Einführung
- **Tiefschweißen mit niedrigem Aspektverhältnis**
- Tiefschweißen mit hohem Aspektverhältnis
 - Einfluss Fokusbereich auf Nahttiefe
 - Beeinflussung der Querschnittsfläche
 - Einfluss der Divergenz
 - Einfluss Laserleistung
 - Nahtqualität
- Zusammenfassung

Schwelle zum Tiefschweißen

**Tiefschweißen = Schweißen mit Dampfkapillare (keyhole):
Nahtquerschnitt tiefer als breit**

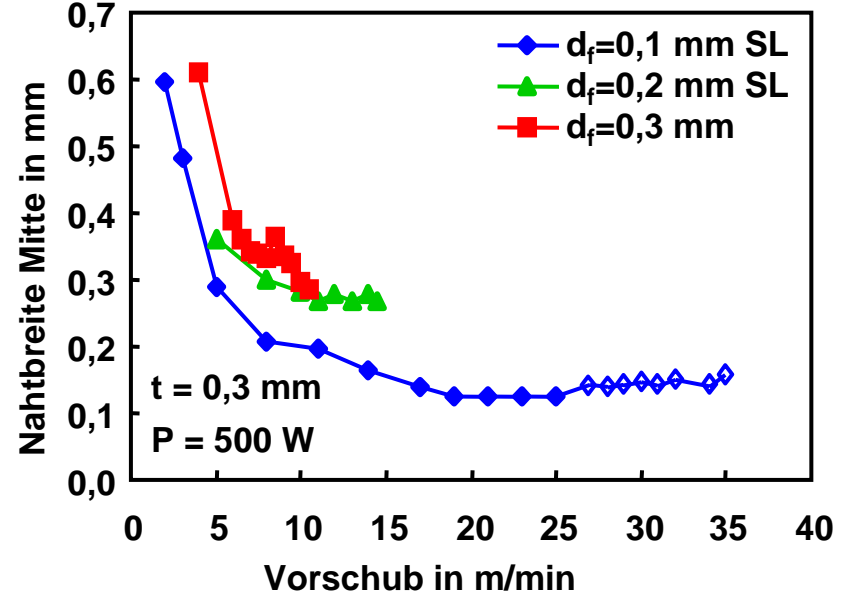
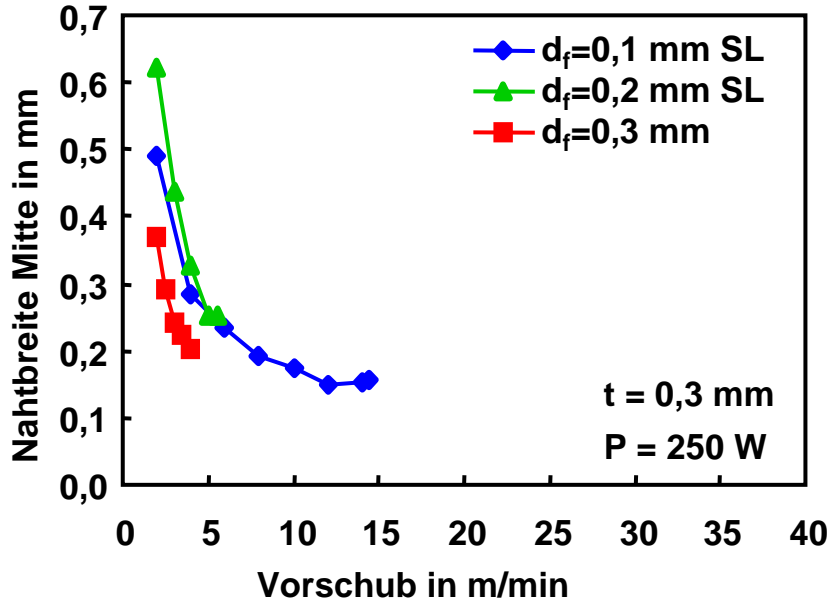


Schwelle: P/d_f



$t_s \sim d_f$

Dünnblechschweißen



maximale Schweißgeschwindigkeit für Durchschweißen:

4 m/min 100%

5.5 m/min 138%

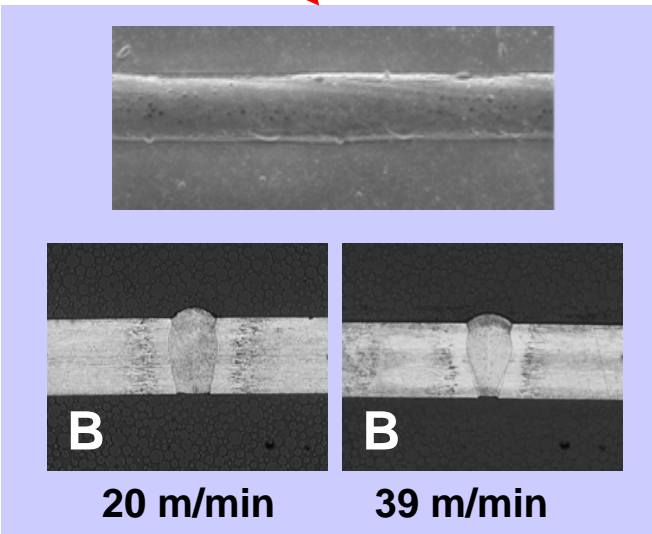
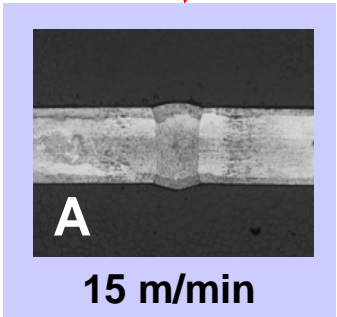
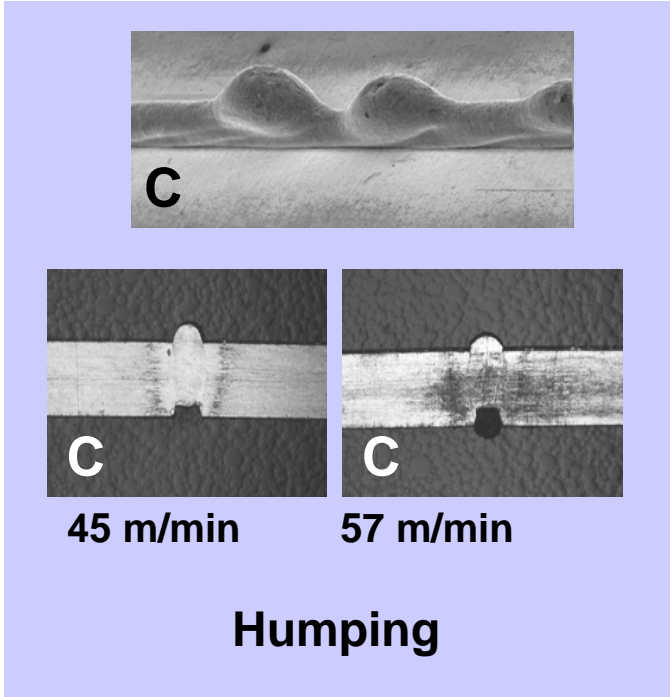
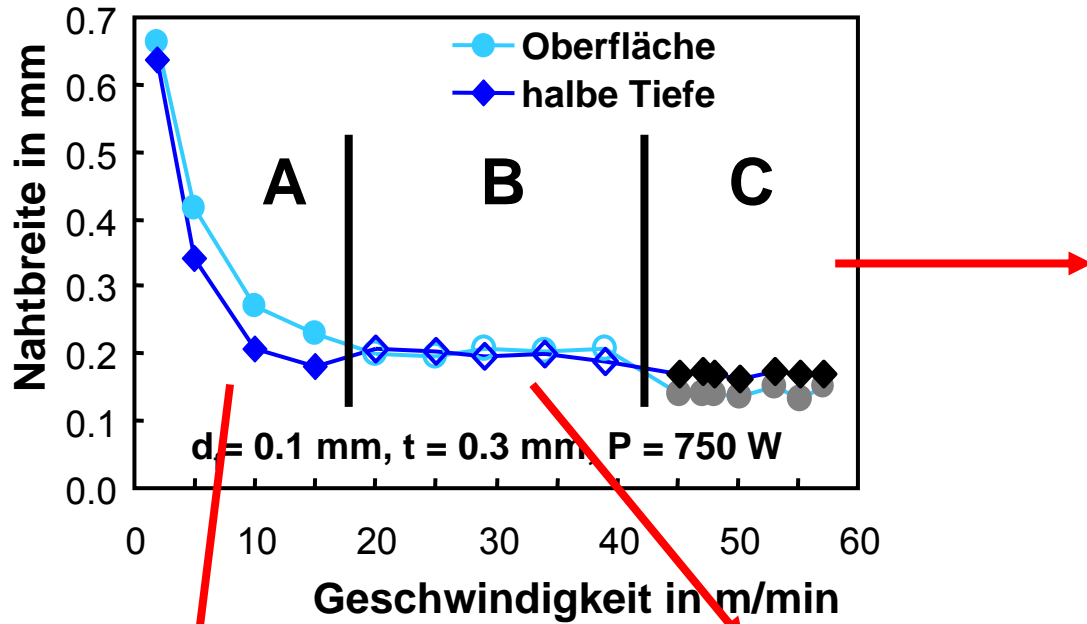
15 m/min 375%

10 m/min 100%

15 m/min 150%

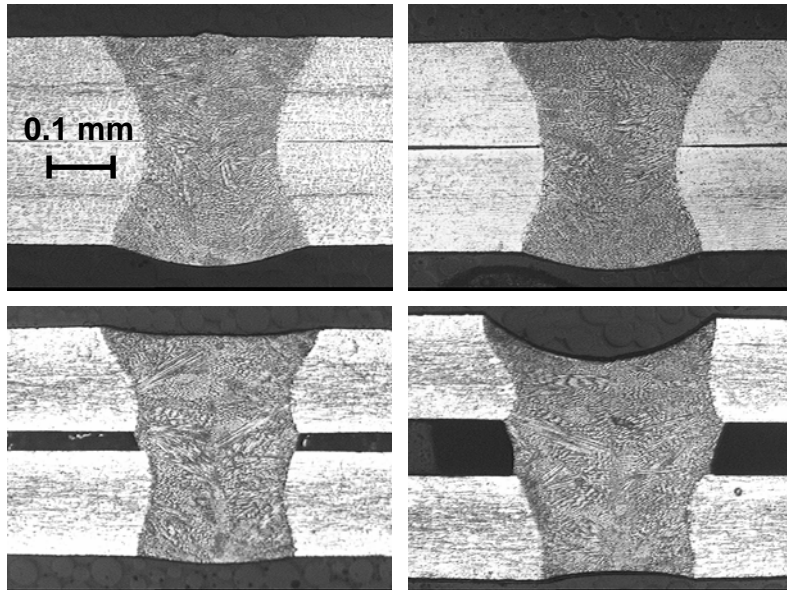
36 m/min 360%

Schweißen von Dünoblech – 750 W und $d_f = 0.1 \text{ mm}$



Tiefschweißen von Dünoblech - Anwendungsbeispiel

nichtrostender Stahl, 2 x 0.15 mm, P = 220 W, v = 3 m/min



Spaltüberbrückung bis $0.6 \times t$!

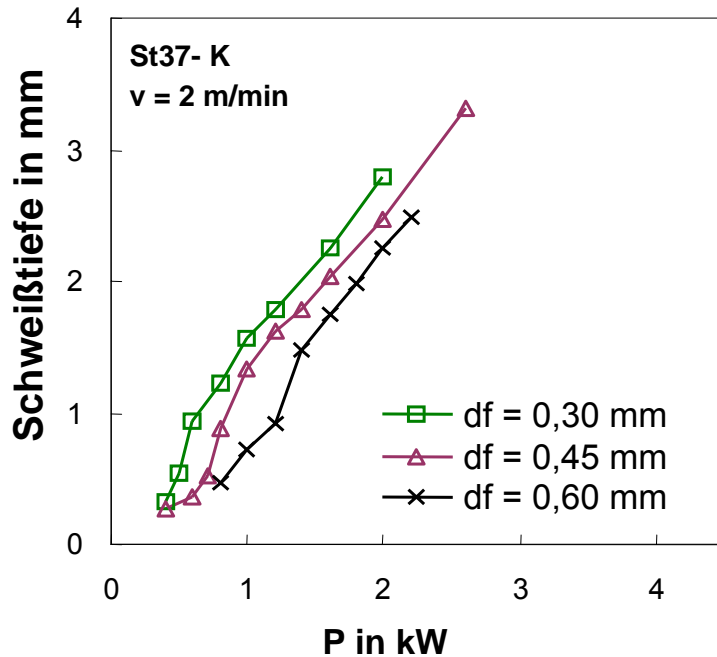


- Einführung
- Tiefschweißen mit niedrigem Aspektverhältnis
- **Tiefschweißen mit hohem Aspektverhältnis**
 - **Einfluss Fokusbereich auf Nahttiefe**
 - Beeinflussung der Querschnittsfläche
 - Einfluss der Divergenz
 - Einfluss Laserleistung
 - Nahtqualität
- Zusammenfassung

Einfluß der Fokussierung auf die Einschweißtiefe

niedrige Pe-Zahl

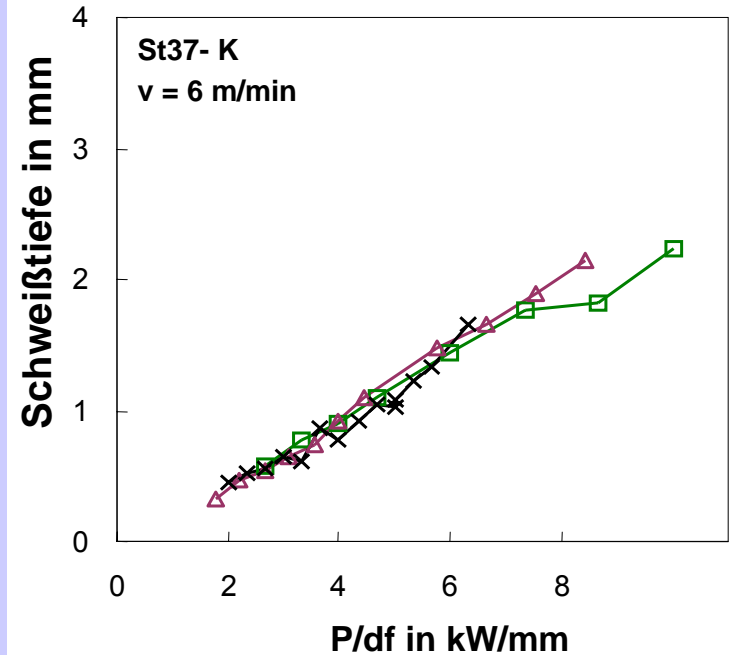
(niedrige Geschwindigkeit,
hohe Temperaturleitfähigkeit)



Tiefe ~ P

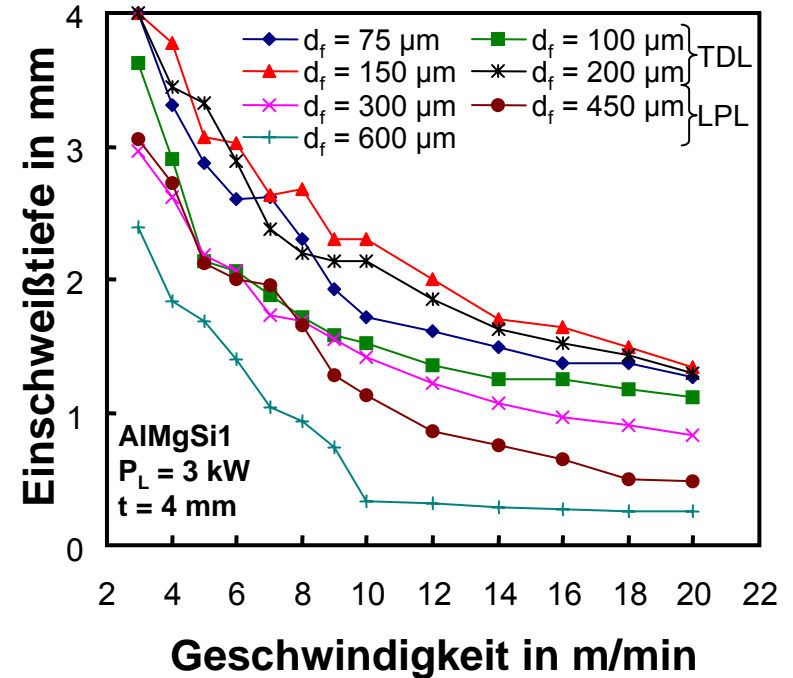
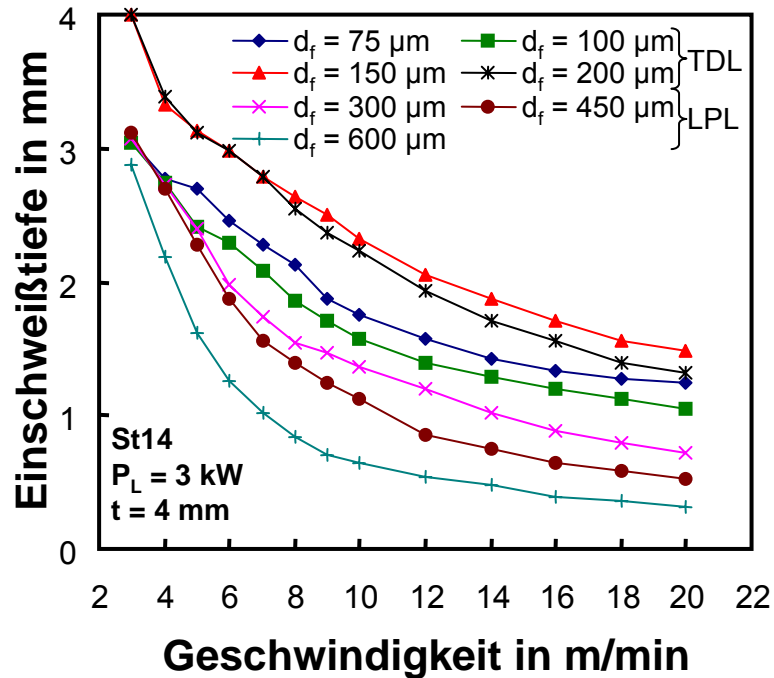
hohe Pe-Zahl

(hohe Geschwindigkeit,
niedrige Temperaturleitfähigkeit)



Tiefe ~ P/d_f

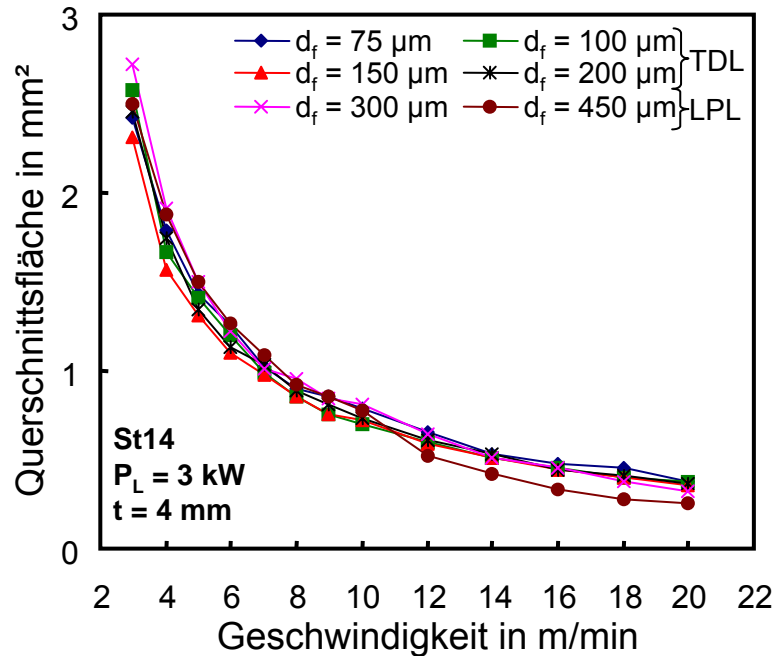
Einfluss des Fokaldurchmessers auf die Einschweißtiefe



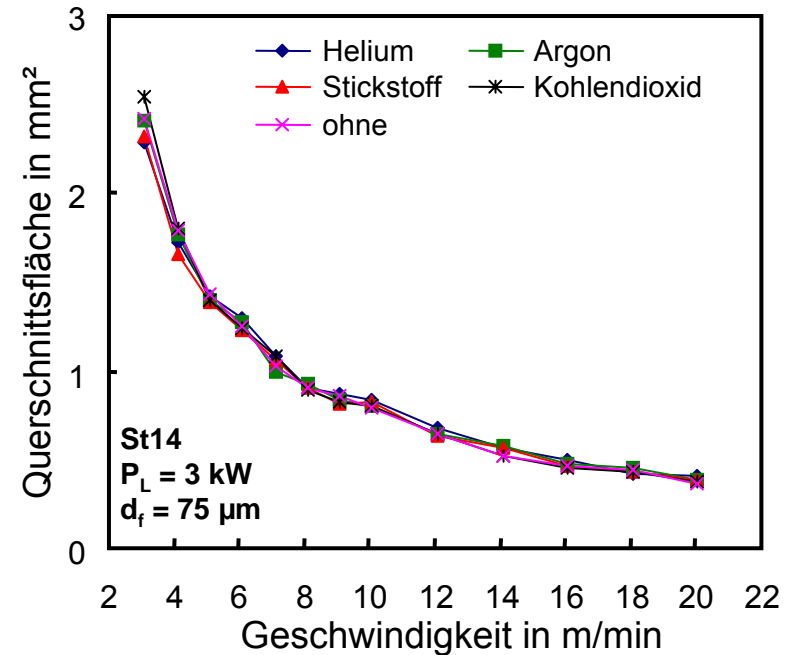
- Reduktion des Fokaldurchmessers führt zur Zunahme der Einschweißtiefe bis $d_f \geq 150 \mu\text{m}$
- für die Fokaldurchmesser 100 μm und 75 μm nimmt die Einschweißtiefe wieder ab

Welcher Mechanismus reduziert die Einschweißtiefe?

Einfluss des Fokaldurchmessers auf die Querschnittsfläche



- Querschnittsfläche ist unabhängig vom Fokaldurchmesser

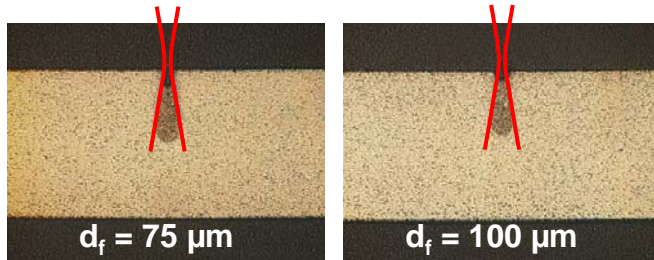


- Querschnittsfläche ist unabhängig vom Schutzgas

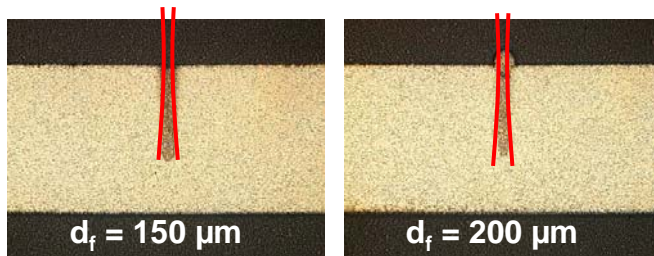
→ kein Plasmaeffekt!

Welcher Mechanismus reduziert die Einschweißtiefe?

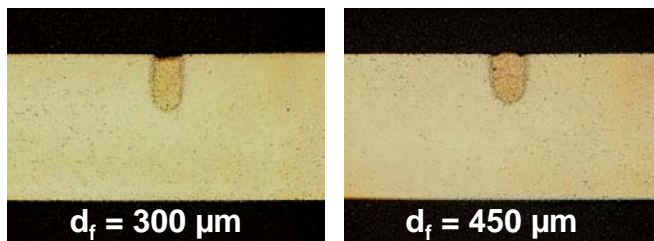
Einfluss des Fokusbereichs auf die Querschnittsfläche



Divergenzwinkel $11,31^\circ$



Divergenzwinkel $5,71^\circ$



Div.-winkel $11,31^\circ$

Div.-winkel $7,59^\circ$

$v = 9 \text{ m/min}$, $P_L = 3 \text{ kW}$
 $t = 4 \text{ mm (Stahl)}$

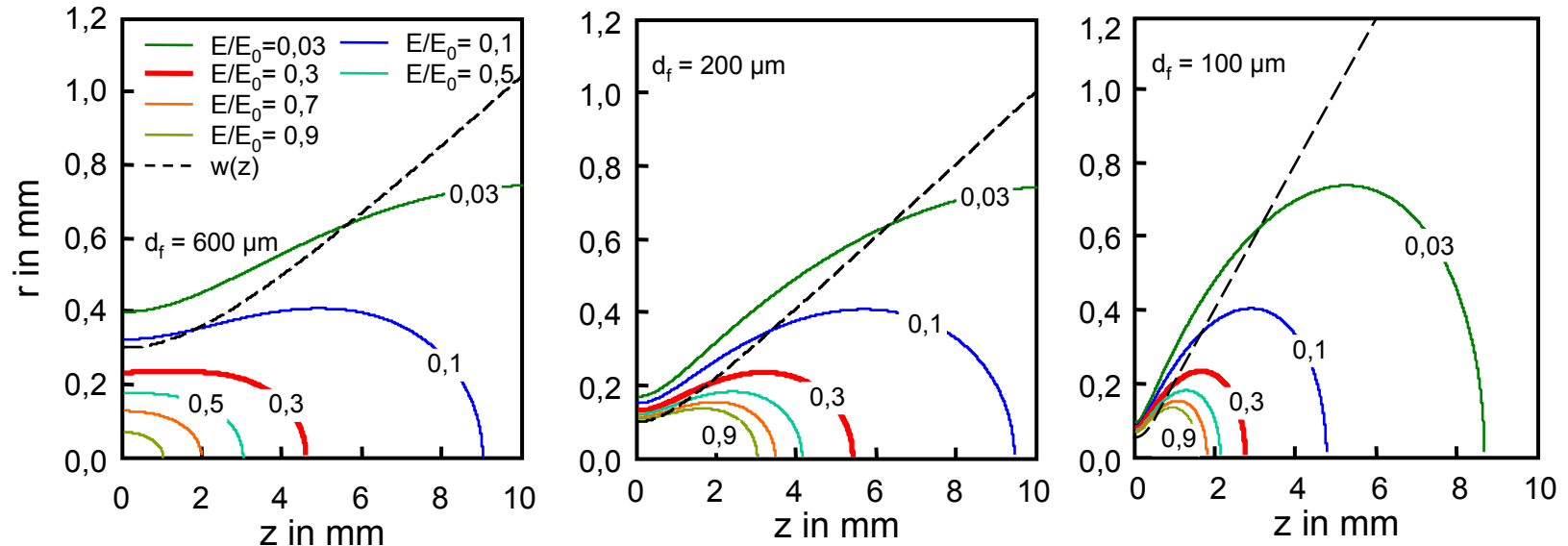
- tropfenförmige Naht
- Flanken der Naht zeigen den gleichen Winkel wie die frei propagierende Laserstrahlung

- extrem schlanke Nahtform

- U-förmige Schweißnaht

Erklärung mit Hilfe der Isophoten.

Isophotenbetrachtung



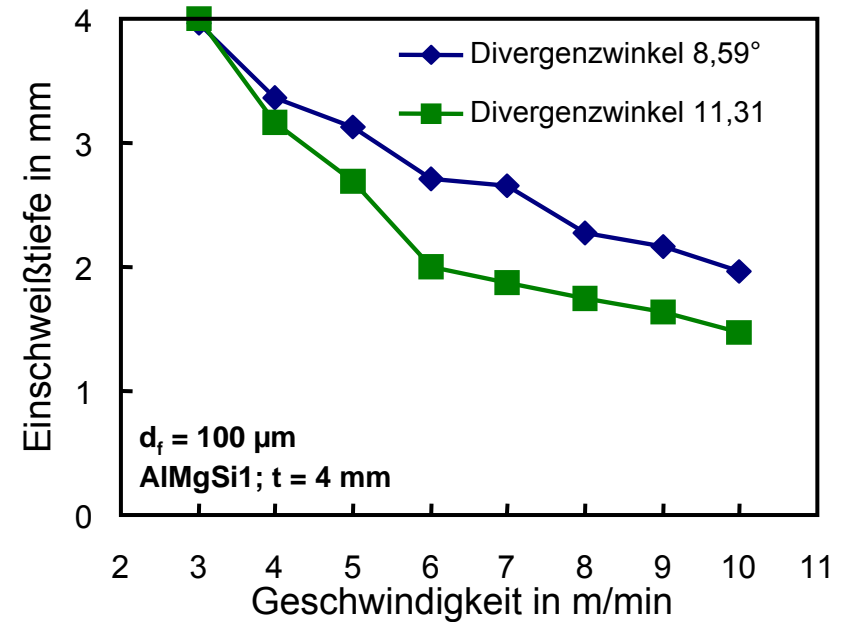
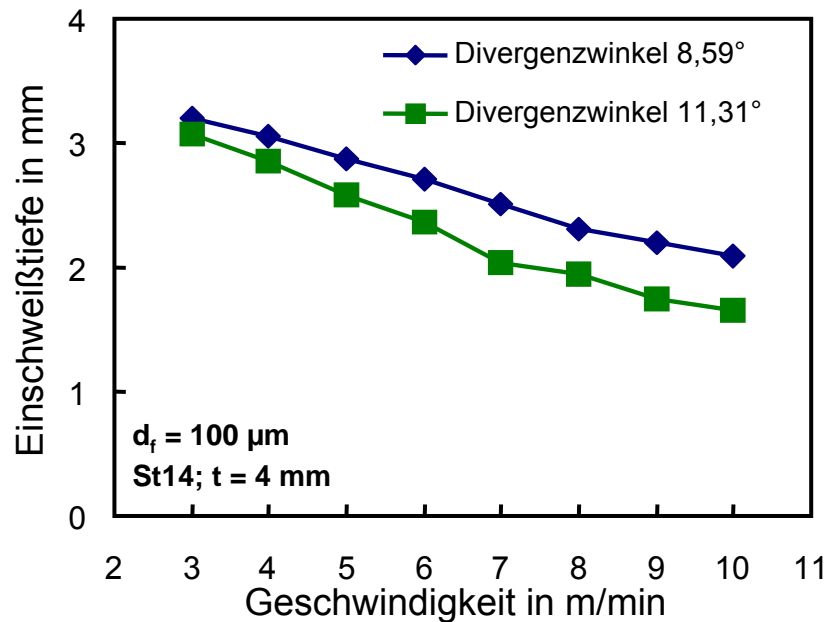
Berechnet für Grundmode und normiert mit E_0 bei $d_f = 600 \mu\text{m}$!

- angenommene Verdampfungsisophote z.B. $E/E_0 \approx 0,3$
- $d_f = 600 \mu\text{m} \rightarrow$ Isophote verläuft parallel zur Strahlachse
- $d_f = 200 \mu\text{m} \rightarrow$ Isophote wird länger aber beginnt auszubauchen
- $d_f = 100 \mu\text{m} \rightarrow$ Ausbauchung nimmt zu und die Länge nimmt ab

Bei $d_f \leq 200 \mu\text{m}$ ist die Naht stark vom Divergenzwinkel beeinflusst.

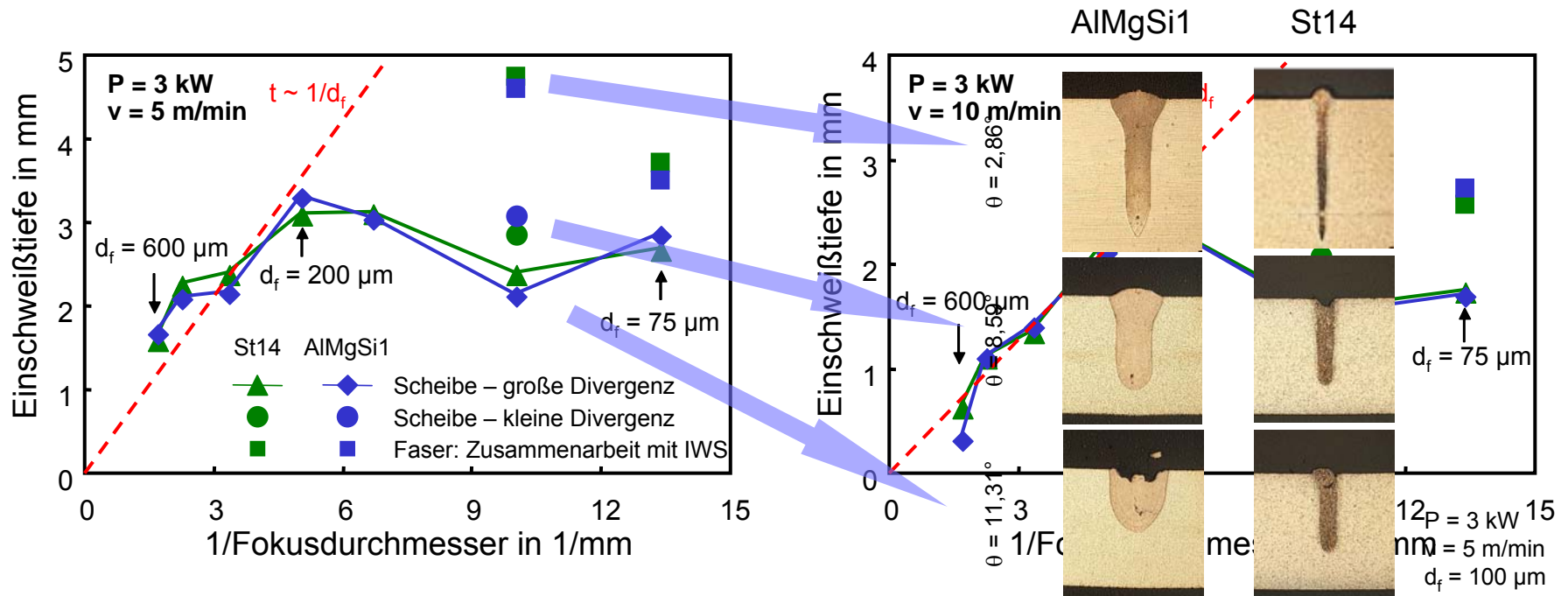
Einfluss des Divergenzwinkels auf Durchmesser kleiner als 200 μm

d_k [μm]	f_k [mm]	f_f [mm]	Abbildungsverhältnis	d_f [μm]	Divergenzwinkel [°]
200	200	100	1:2	100	11,31
150	150	100	1:1,5	100	8,59



- kleiner Divergenzwinkel führt zu größerer Einschweißtiefe

Abhängigkeit der Einschweißtiefe vom Fokaldurchmesser

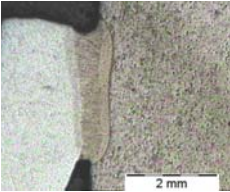

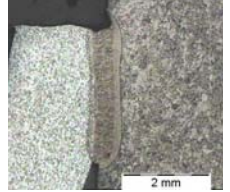

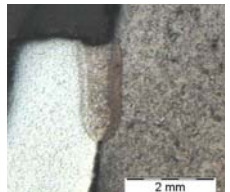



- für Durchmesser bis $200 \mu\text{m}$ ist die Einschweißtiefe proportional zu $1/d_f$
- bei kleinen Fokaldurchmessern ist die Einschweißtiefe durch den Divergenzwinkel begrenzt
- eine Verkleinerung des Divergenzwinkels aufgrund Laser stärkerer Fokussierbarkeit führt zu einer Erhöhung der Einschweißtiefe

Beispiel aus der industriellen Anwendung – Powertrain



Schweißen von Getriebebauteilen
 Material: Bau- und Einsatzstähle
 Einschweißtiefe: $t = 3 \text{ mm}$

Lasertyp	Schliffbild	Nahtgeometrie	Oberraupe
CO ₂ -Laser $d_f = 200 \text{ } \mu\text{m}$ $v = 3 \text{ m/min}$		$b = 0,52\text{mm}$ $t = 3,22\text{mm}$ $A = 1,62\text{mm}^2$	
Scheibenlaser $d_f = 200 \text{ } \mu\text{m}$ $v = 5 \text{ m/min}$		$b = 0,50\text{mm}$ $t = 3,23\text{mm}$ $A = 1,52\text{mm}^2$	
Scheibenlaser $d_f = 150 \text{ } \mu\text{m}$ $v = 5 \text{ m/min}$		$b = 0,67\text{mm}$ $t = 2,16\text{mm}$ $A = 1,35\text{mm}^2$	

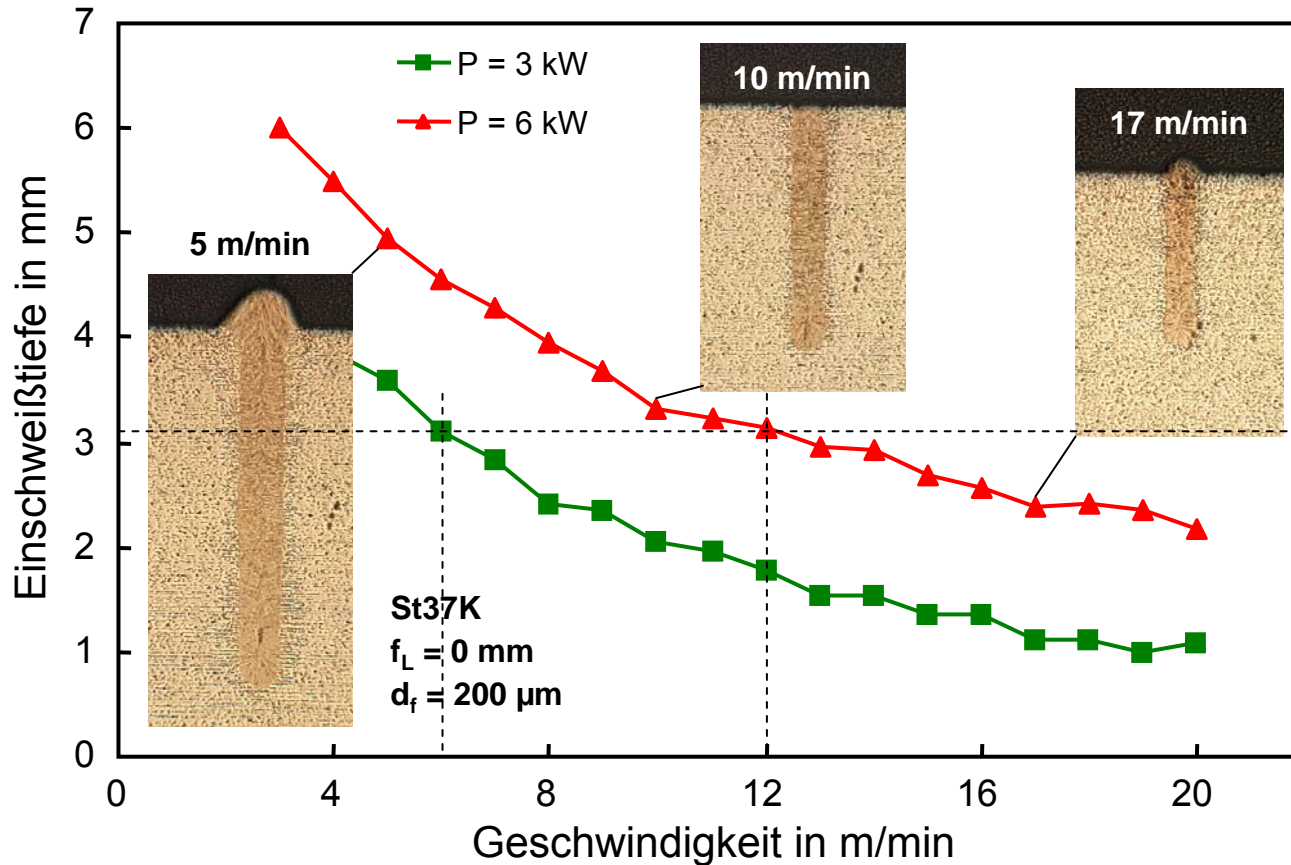
$P_L = 2,6 \text{ kW}$

Gleiche Ergebnisse bei
 höherer Geschwindigkeit

Fokusbereich
 ist zu gering

- Einführung
- Tiefschweißen mit niedrigem Aspektverhältnis
- Tiefschweißen mit hohem Aspektverhältnis
 - Einfluss Fokusbereich auf Nahttiefe
 - Beeinflussung der Querschnittsfläche
 - Einfluss der Divergenz
 - **Einfluss Laserleistung**
 - Nahtqualität
- Zusammenfassung

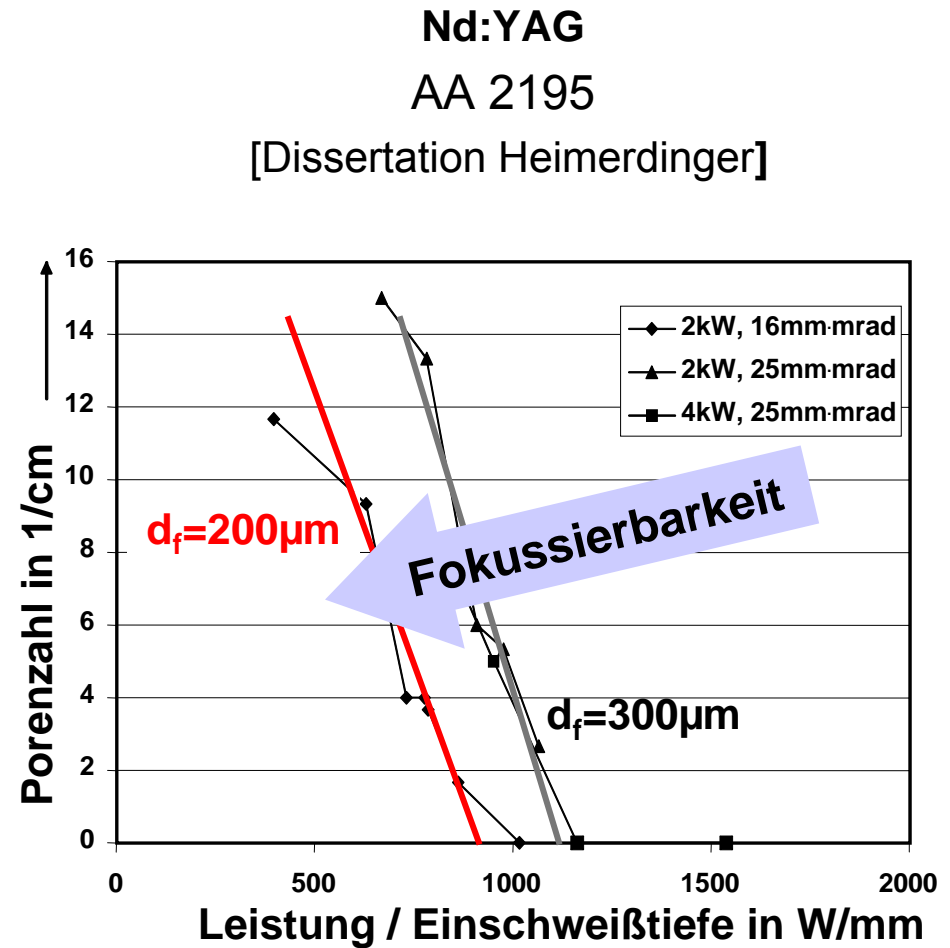
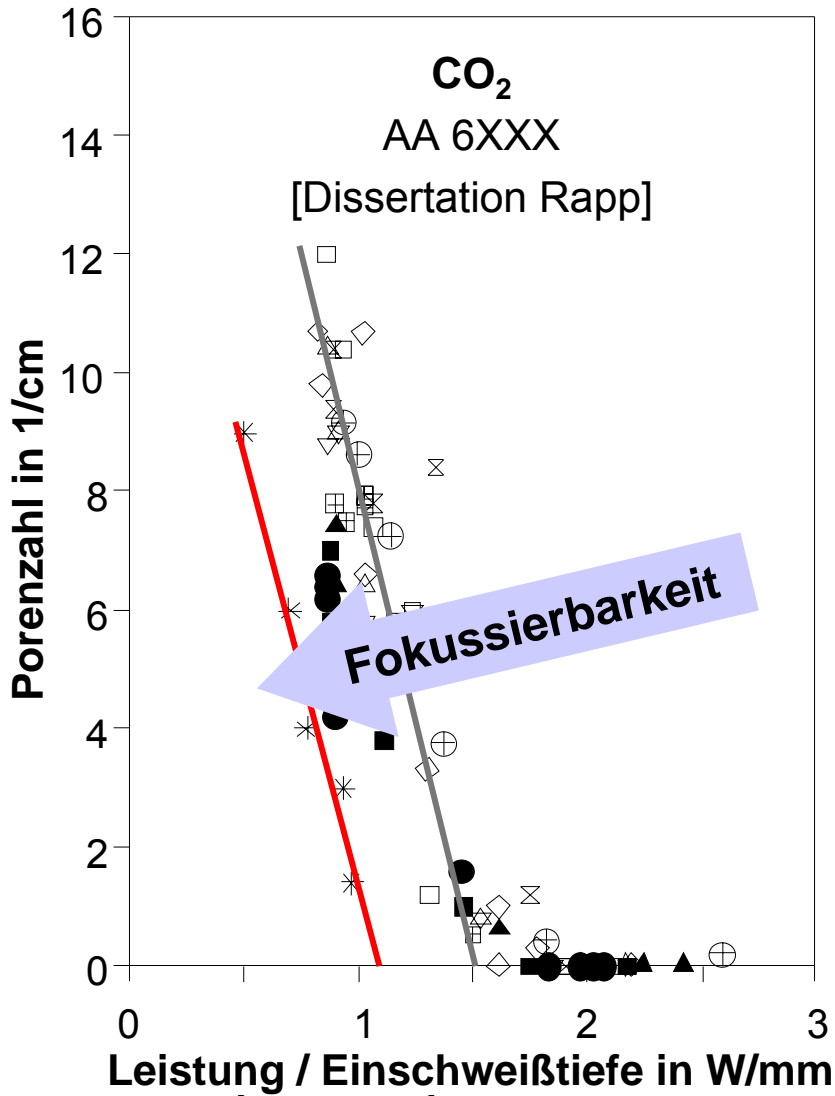
Einfluss der Leistung auf die Einschweißtiefe



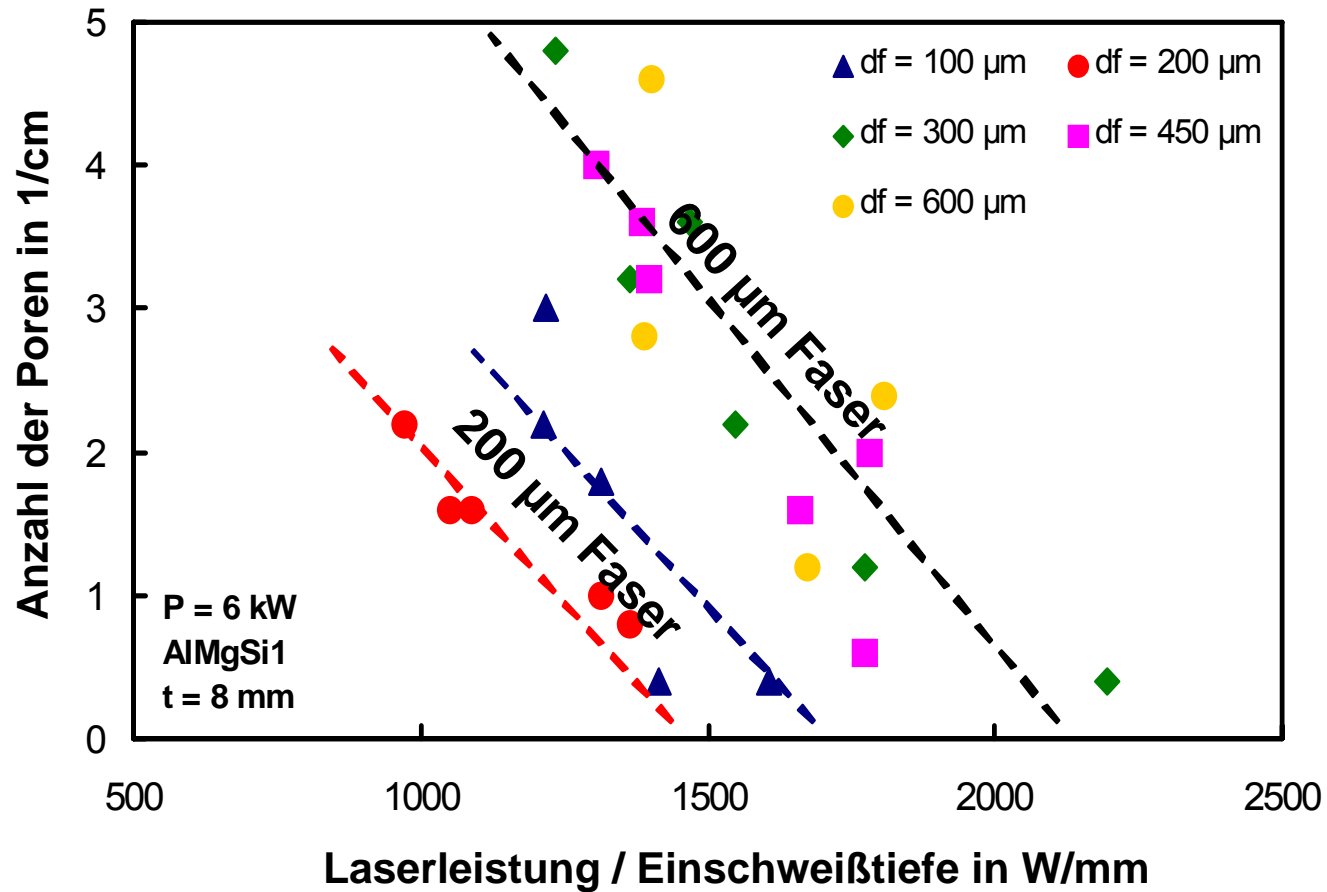
- Bei hoher Geschwindigkeit:
 - Tiefe proportional Leistung
 - Geschwindigkeit proportional Leistung
- Aspektverhältnis ähnlich EB

- Einführung
- Tiefschweißen mit niedrigem Aspektverhältnis
- Tiefschweißen mit hohem Aspektverhältnis
 - Einfluss Fokusbereich auf Nahttiefe
 - Beeinflussung der Querschnittsfläche
 - Einfluss der Divergenz
 - Einfluss Laserleistung
 - **Nahtqualität**
- Zusammenfassung

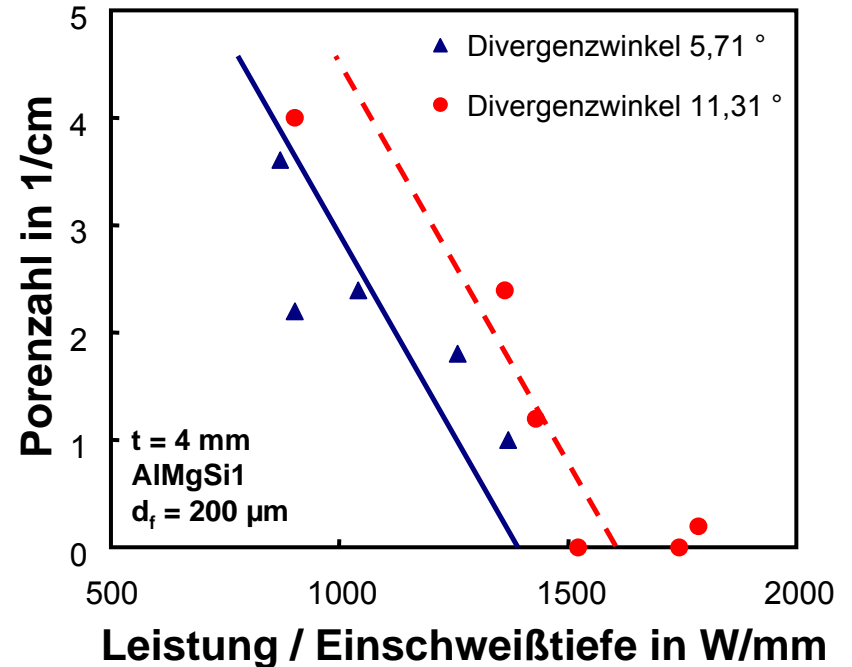
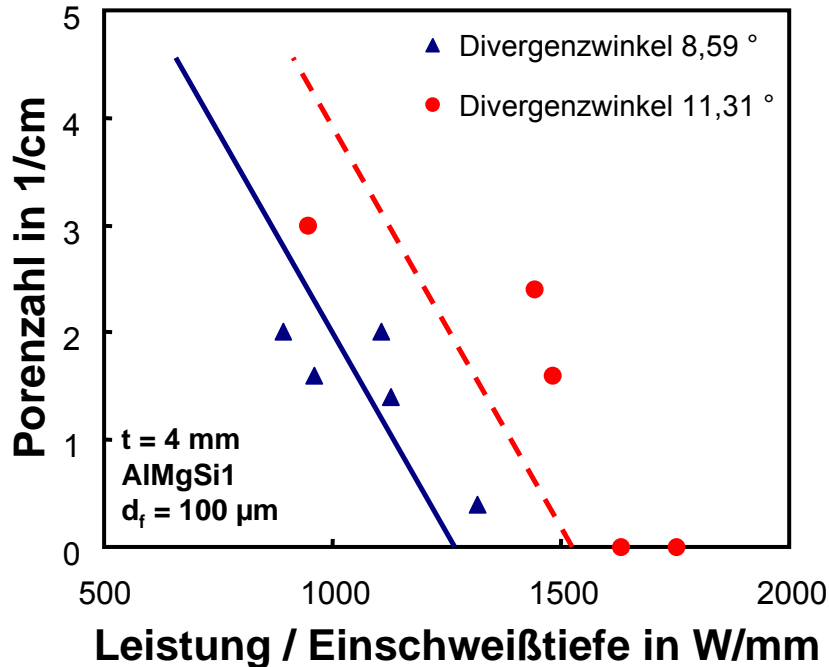
Prozesssporen bei höherer Fokussierbarkeit



Fokussierbarkeit beeinflusst die Nahtqualität



Einfluss des Divergenzwinkels auf die Porenbildung



- geringere Divergenz führt zur Abnahme der Poren ($d_{\text{Poren}} > 0,2 \text{ mm}$)

Erklärung: Flaschenhalskapillare instabil [Dissertation Beck 1995].

Stärkere Fokussierbarkeit ermöglicht

- niedrigere Schwelle für Tiefschweißen
- Nahtquerschnitte mit hohem Aspektverhältnis (ähnlich EB)
- bei hoher Geschwindigkeit:
lineare Skalierung von Tiefe und Geschwindigkeit mit Leistung
- höhere Prozessstabilität (Al-Legierungen)

jedoch:

- negativer Einfluss des Fokussierwinkels bei kleinen Fokusdurchmessern

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!