

NE Drahtforum

Wärmebehandlung und Glühen

Aurubis
Metals for Progress

BECHEM
LUBRICATION
TECHNOLOGY

Cu Deutsches Kupferinstitut
Copper Alliance

NIEHOFF
GRUPPE

Gliederung



Dr. Rainer Menge

1. Anlagen zur Herstellung von Kupfervordraht
   - Properzi
   - Contirod
   - Southwire
   - Dipforming
   - Upcast
   - Rautomead
   - Conform

2. Kupfer und Schnellwärmebehandlung
   - Erfahrungen und technische Parameter

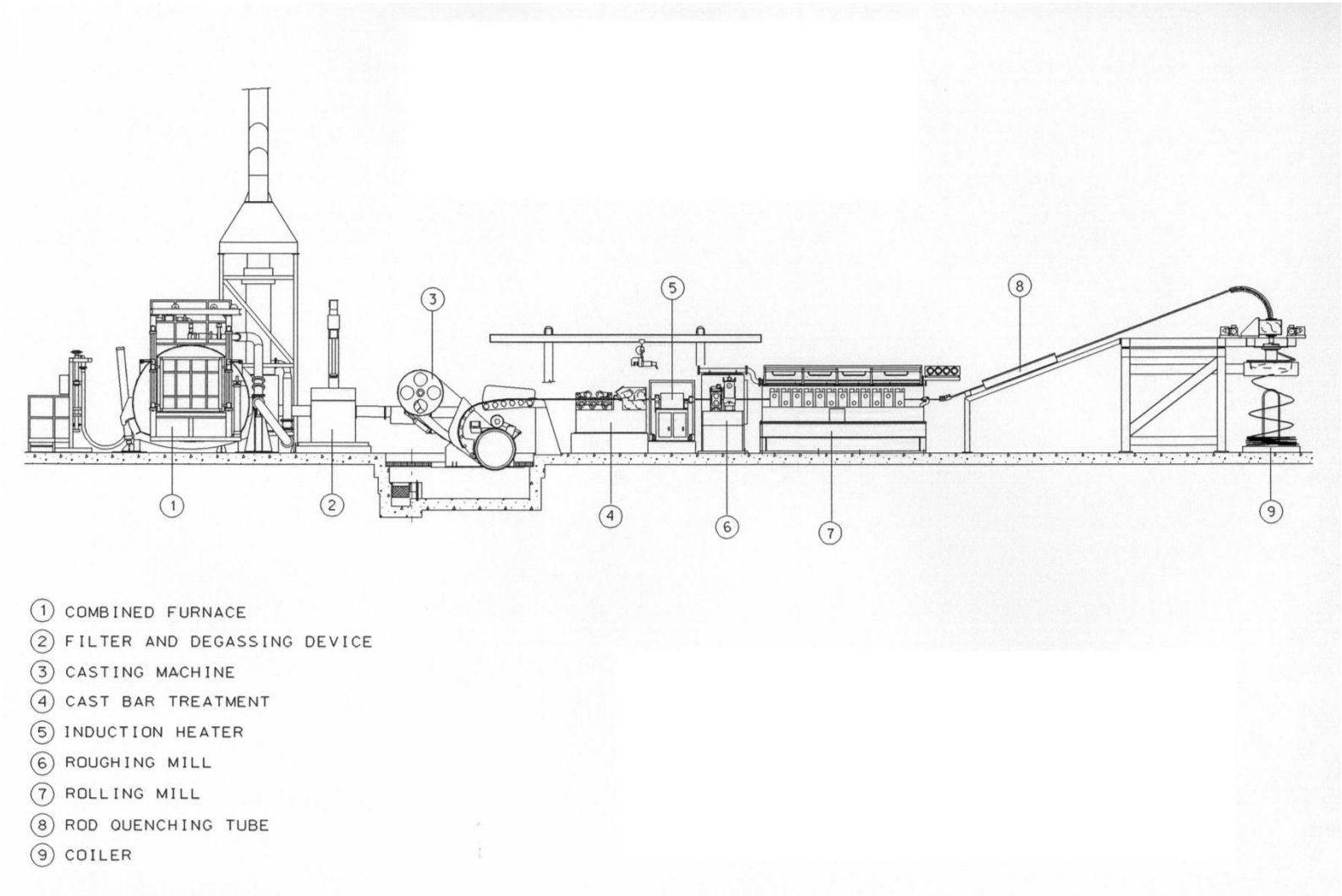
3. Widerstands- und Induktionsglühen
   - Oberwellen
   - Neue Entwicklungen

4. Zusammenfassung

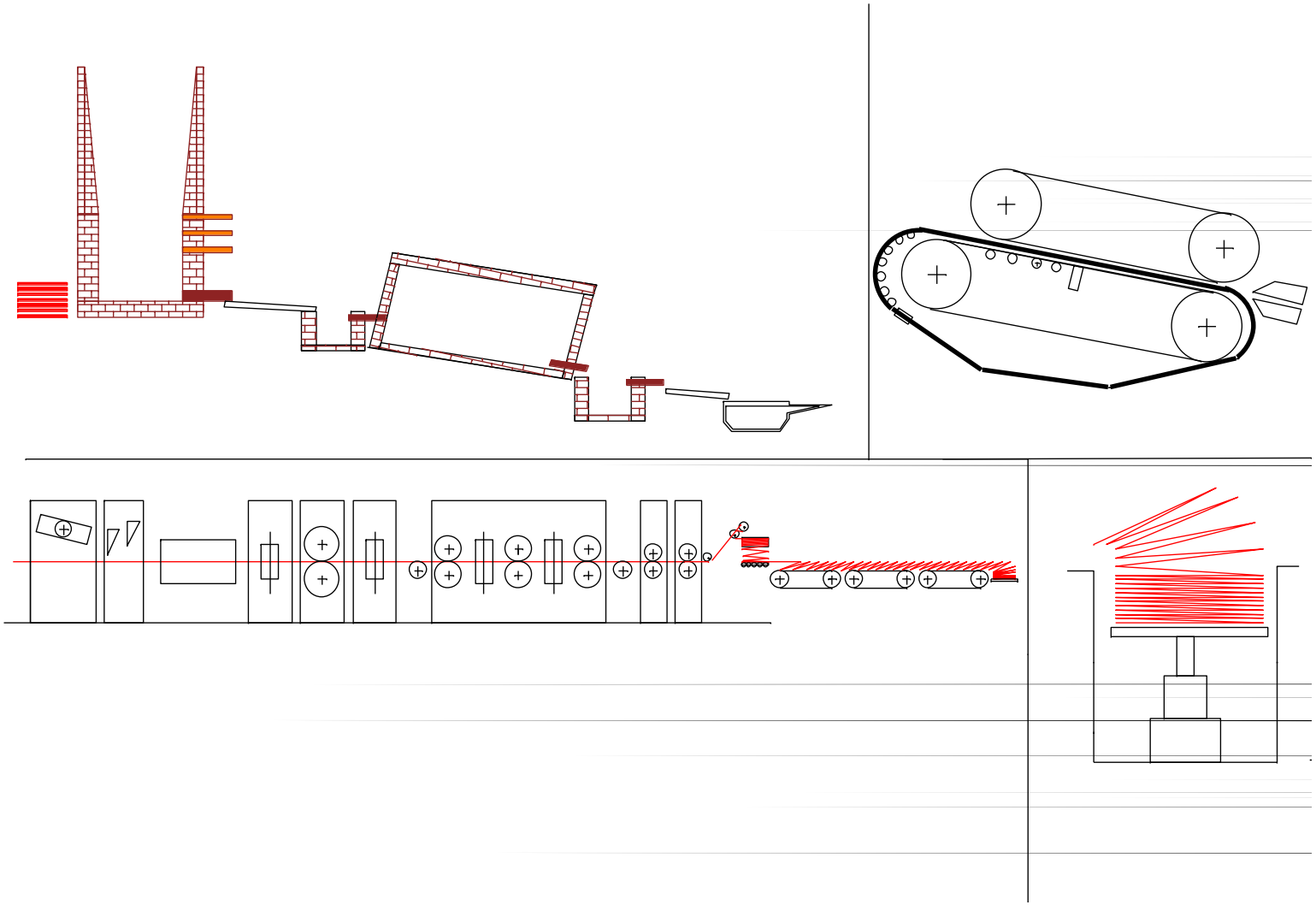
Properzi



Dr. Rainer Menge



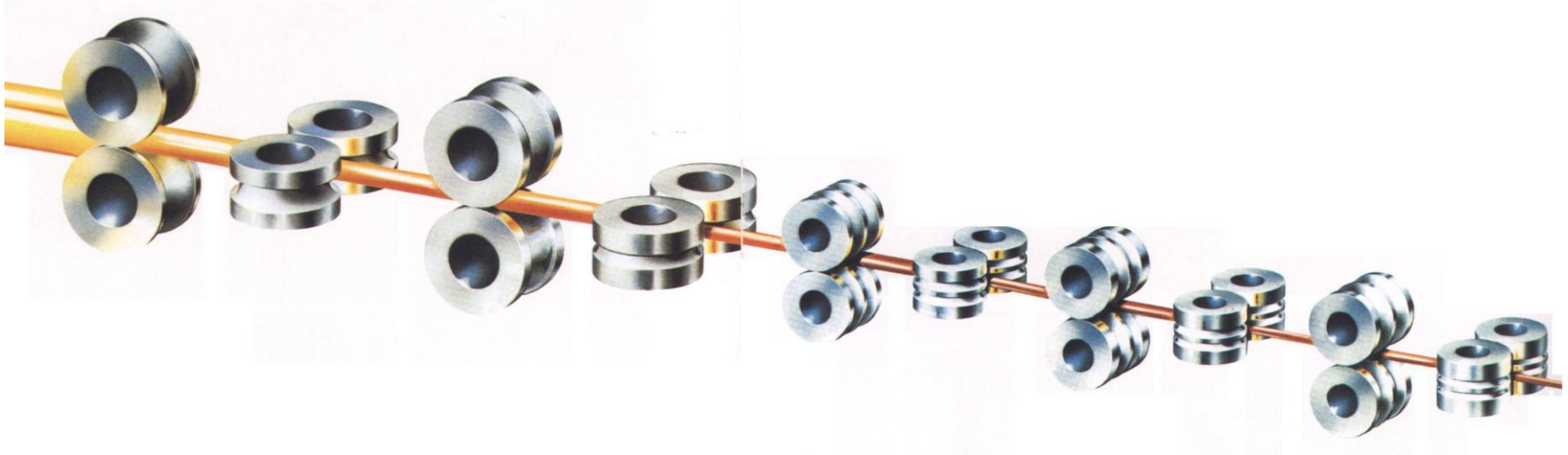
Contirod 1

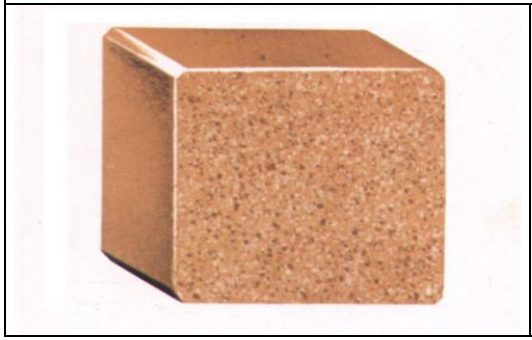
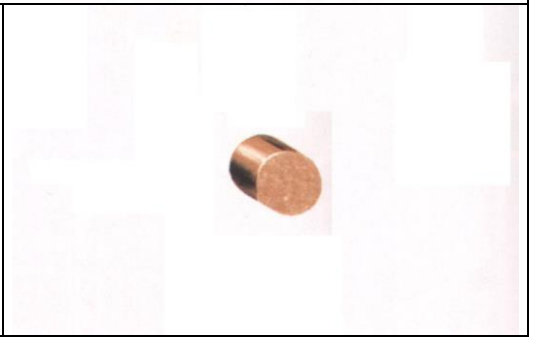


Contirod 2



Dr. Rainer Menge

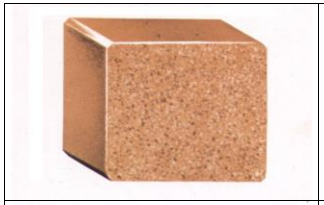
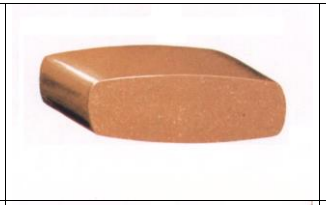
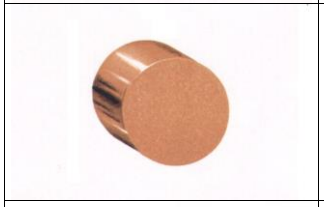


	Ausgangsquerschnitt Gießstrang = 35 x 30 mm² = 1050 mm²	Endmaß 8 mm Ø = 50 mm²	

Contirod 3; Rund-Oval-Kalibrierung mit offenen Duo-Walzen



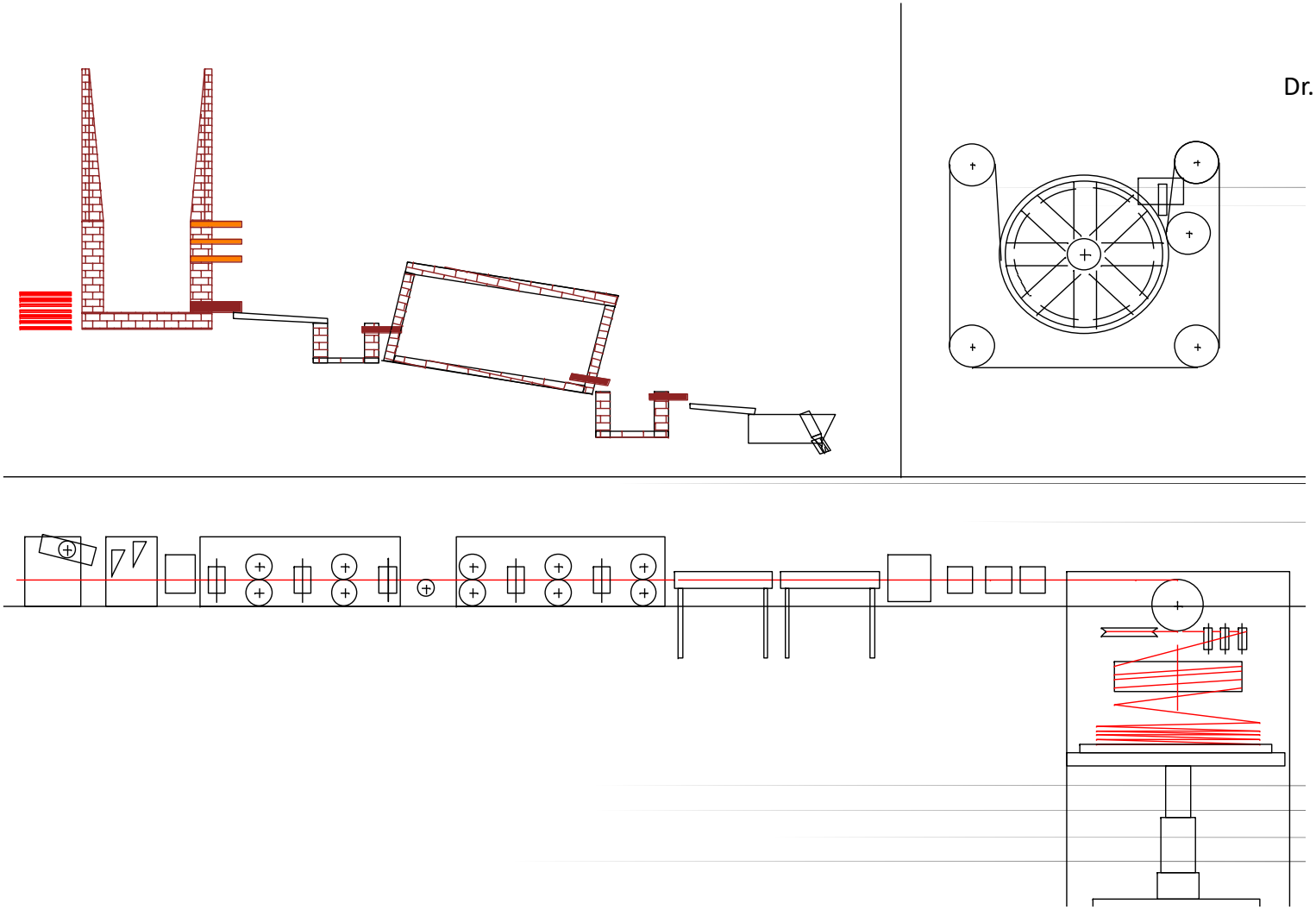
Dr. Rainer Menge

		Links: Ausgangskaliber (Gußstrang mit geschabten Kanten) Rechts: 1. Stich Anstich des Rechteck-Kalibers zum Oval-Kaliber
		Links: 2. Stich (rund) Rechts: 3. Stich (oval)
		Links: 4. Stich (rund) mögliches Endmaß Rechts: 5. Stich (oval)
		Links: 6. Stich (rund) mögliches Endmaß Rechts: 7. Stich (oval)
		Links: 8. Stich (rund) mögliches Endmaß Rechts: 9. Stich (oval)
		Links: 10. Stich (rund) Endmaß 8,00 mm Ø

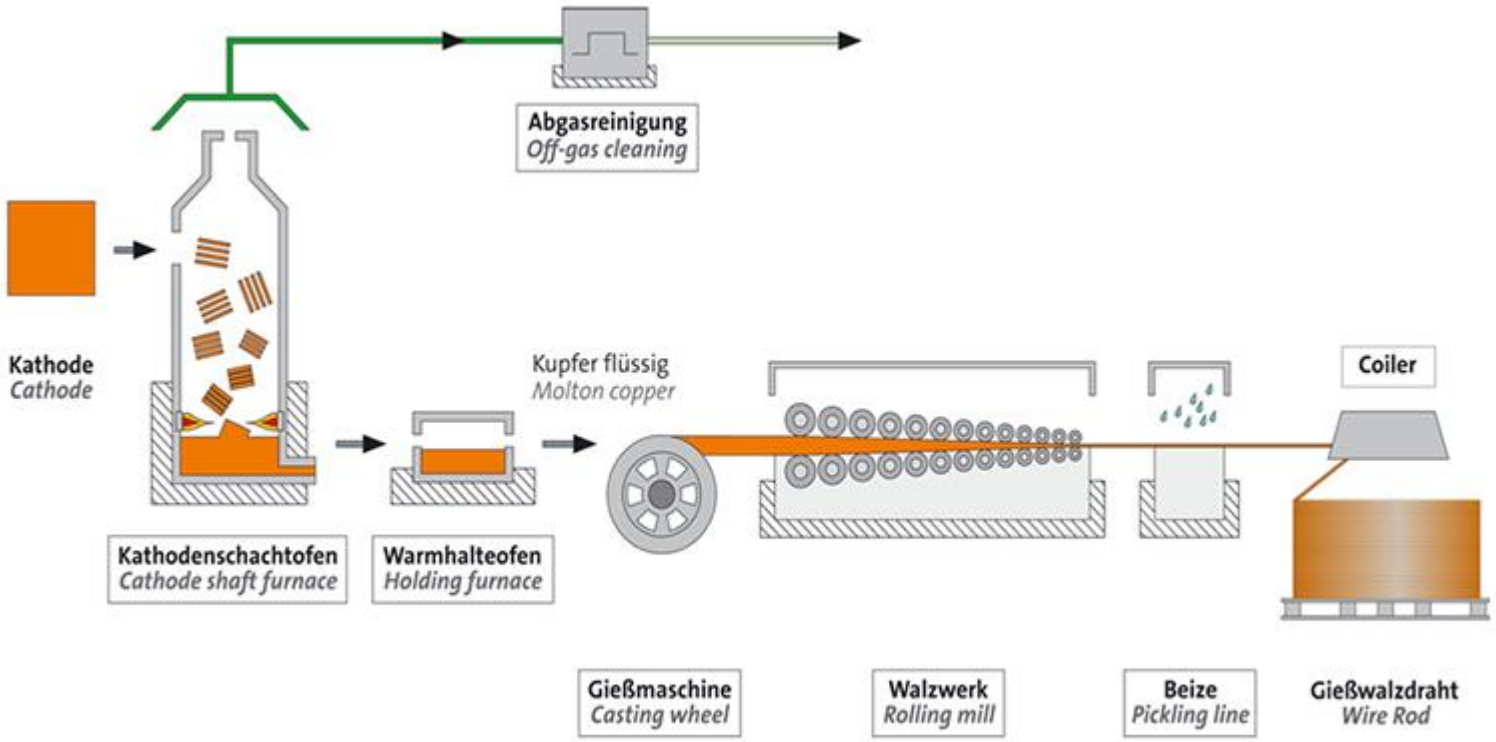
Southwire 1



Dr. Rainer Menge



Southwire 2

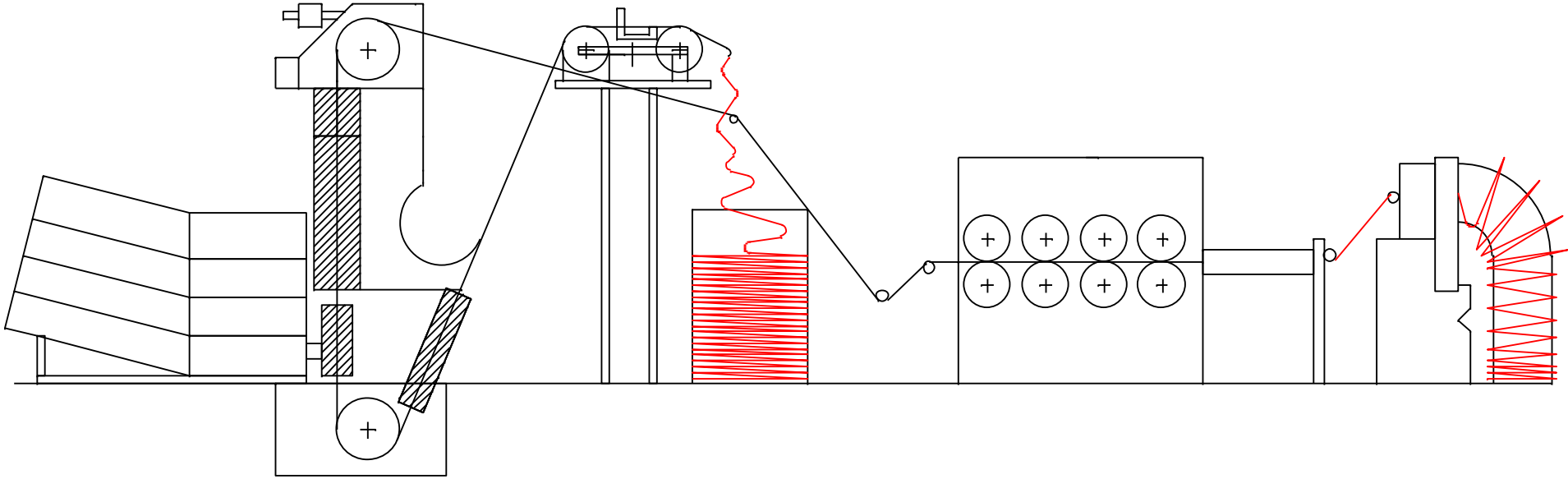


Dr. Rainer Menge

Dipforming – Tauch-Walz-Verfahren



Dr. Rainer Menge



Dipforming



Dr. Rainer Menge

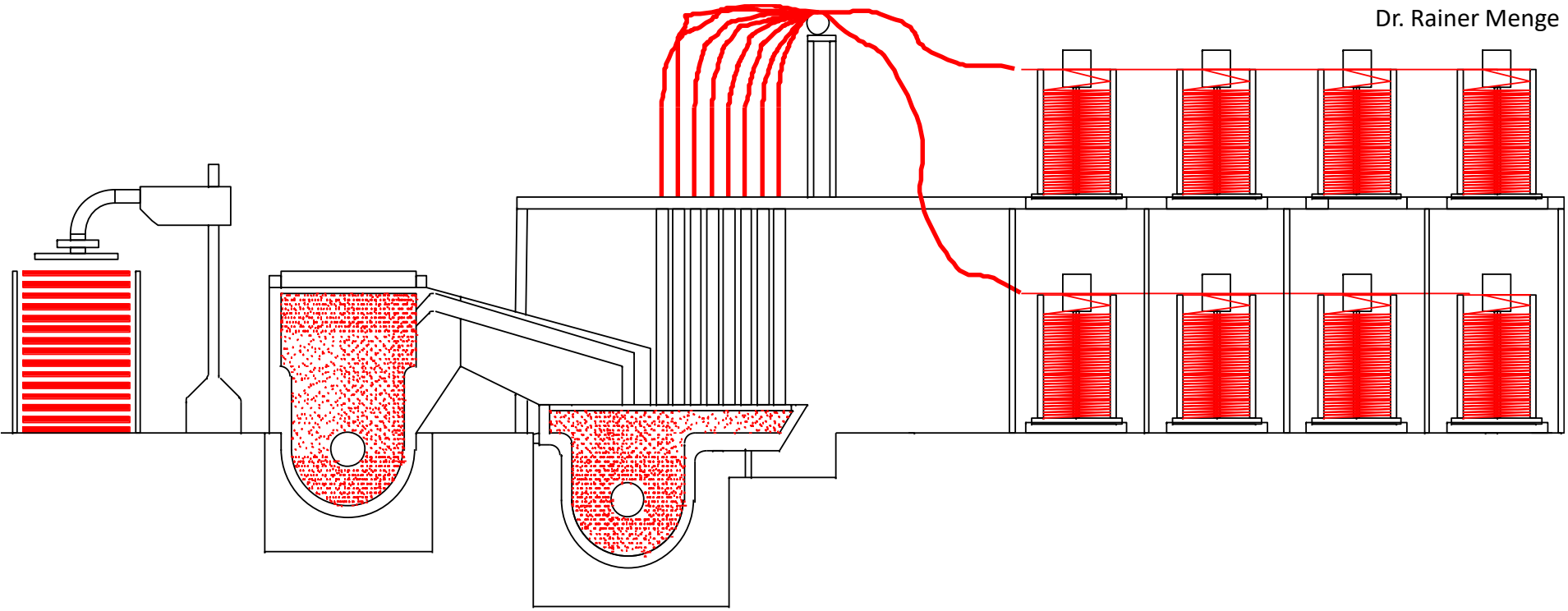




Upcast 1



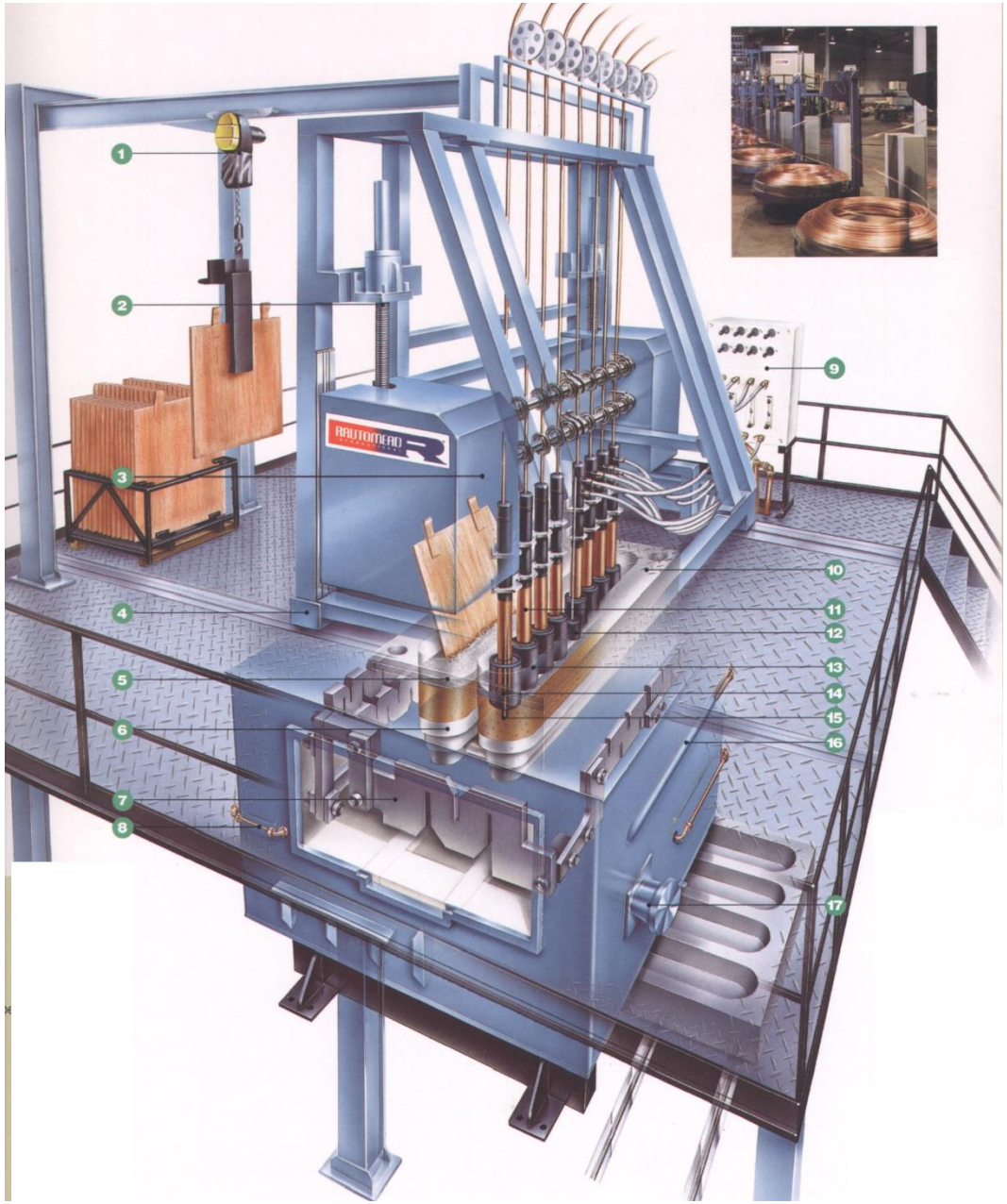
Dr. Rainer Menge



Upcast 2



Rautomead

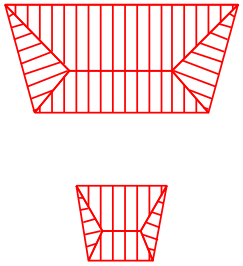
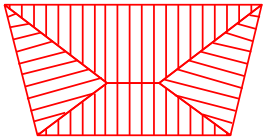
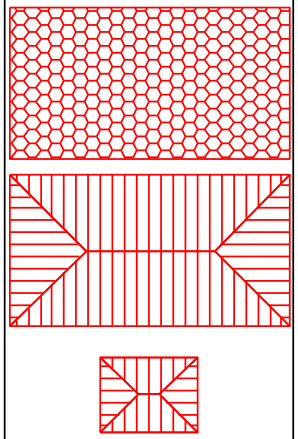
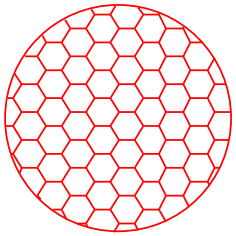
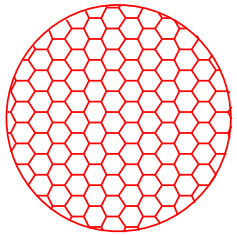
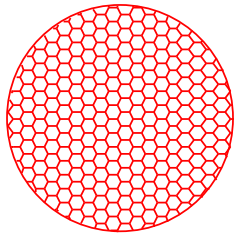
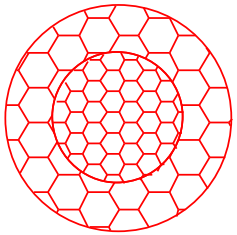
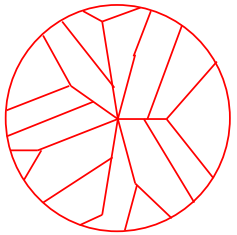


Dr. Rainer Menge

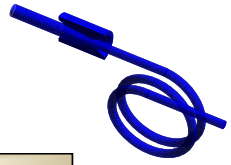
Gefügevergleich

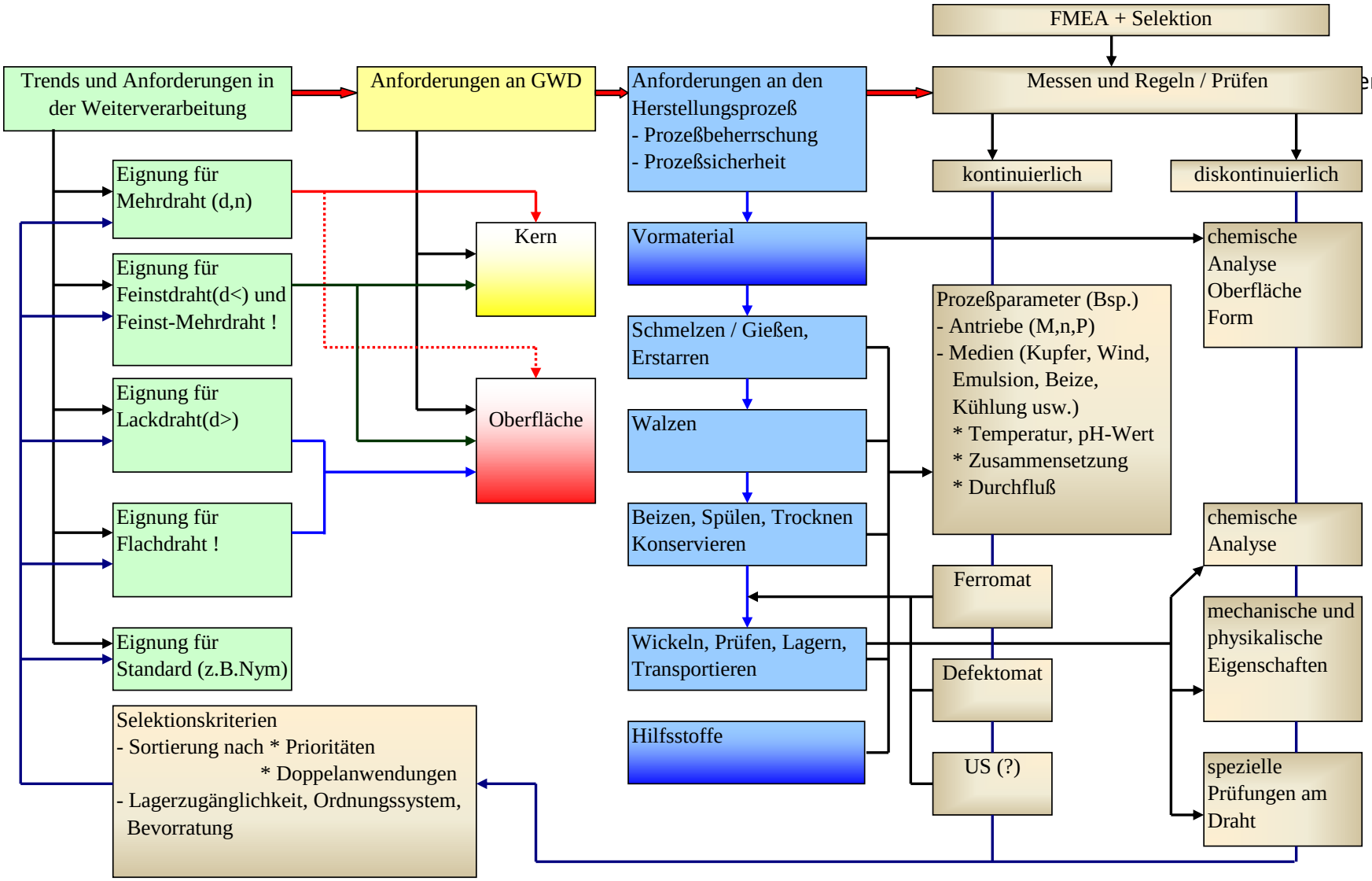


Dr. Rainer Menge

Verfahren	Properzi	Southwire	Contirod	Dip-forming	Upcast
Strang					
Draht					

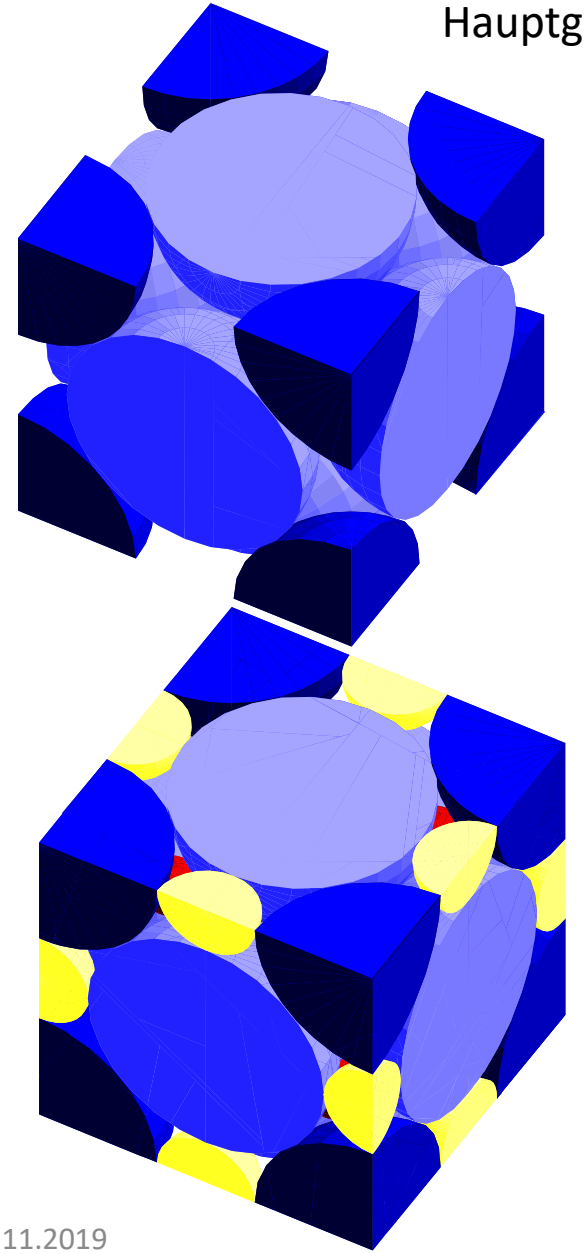
Anforderungen an den Vordraht



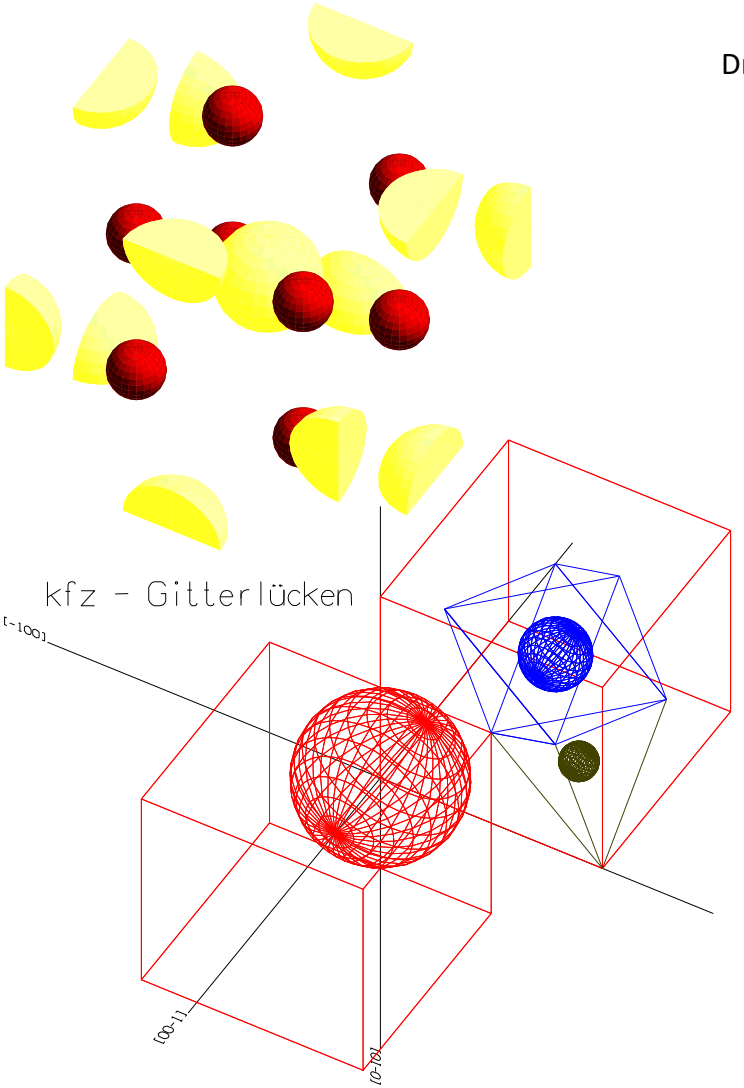


Kupfer kubisch-flächenzentriertes Gitter

Hauptgitterplätze



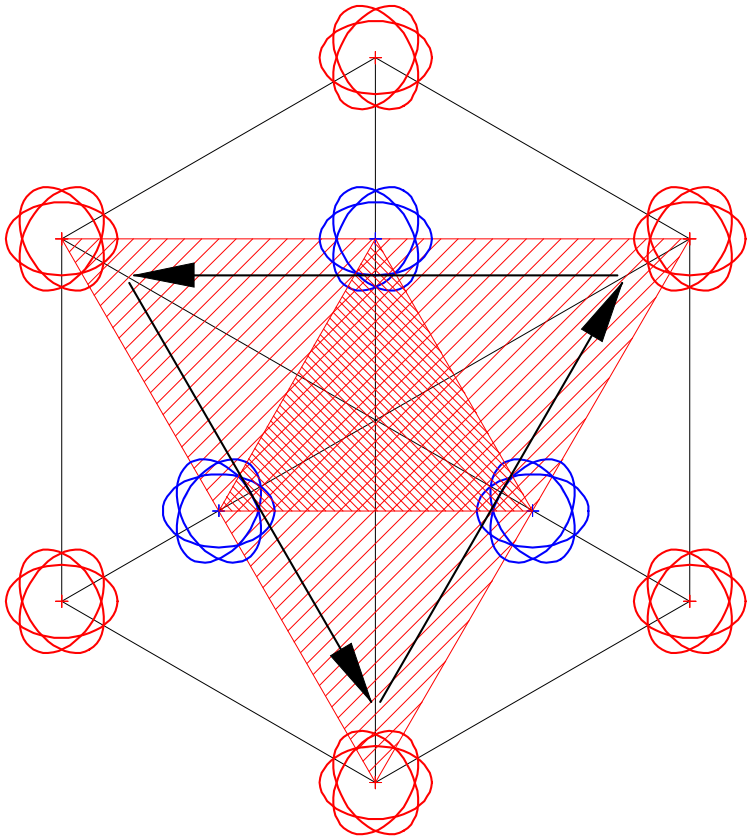
Gitterlücken
- Oktaeder und Tetraeder



Dr. Rainer Menge

Kupfer Gleitsysteme

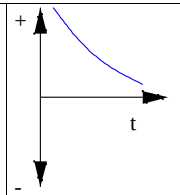
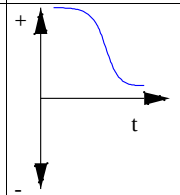
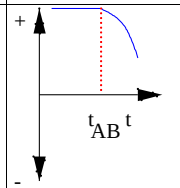
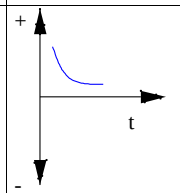
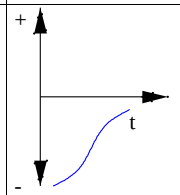
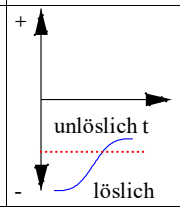
Dr. Rainer Menge



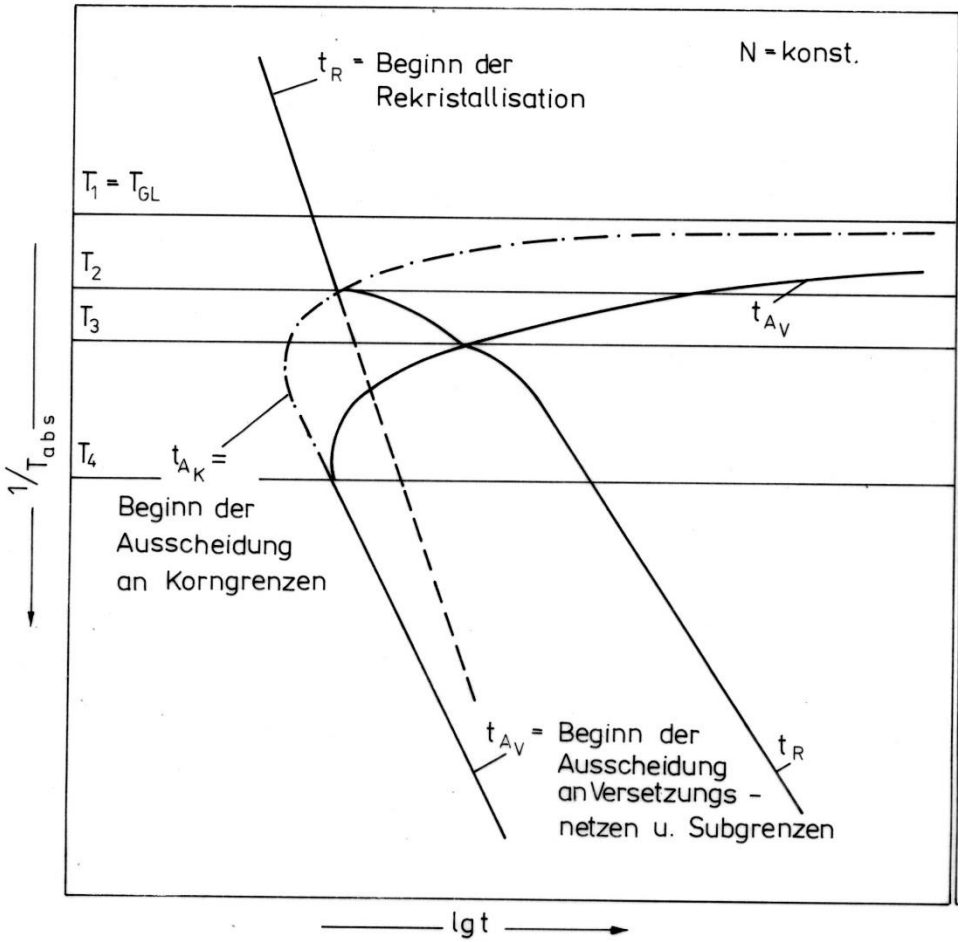
GE {111}
GR ⟨110⟩
GE(4) x GR(3) = 12 GS

Die Gleitebenen sind die dichtest gepackten Ebenen {111}; Oktaeder-Flächen
Die Gleitrichtungen sind die dichtest gepackten Richtungen ⟨110⟩; Flächendiagonalen

Schnellrekristallisation

Beschleunigende Kräfte in den Versetzungen gespeicherte Umformenergie $p_N \approx \mu \cdot b^2 \cdot (N_1 - N_0)$		μ – Schubmodul b – Burgersvektor N_1 – Versetzungsdichte nach der Umformung N_0 – Versetzungsdichte vor der Umformung
lokaler Leerstellenüberschuß $p_L = k \cdot T \cdot c_1 \cdot \ln\left(\frac{c_1}{c_0}\right)$		T – Glühtemperatur c_1 – Leerstellendichte bei Übersättigung c_0 – Leerstellendichte im Gleichgewicht
diskontinuierliche Ausscheidung $p_L = \frac{R \cdot (T - T_1)}{V} \cdot c_A \cdot \ln(c_A) + \frac{2 \cdot f \cdot \sigma}{\lambda}$		V – Molvolumen T_1 – Lösungstemperatur c_A – max. Konz. bei T_1 f – Volumenanteil der Ausscheidung σ – spezifische Grenzflächenenergie Ausscheidung / Matrix λ – Partikelabstand
Korngrenzenenergie $p_G = \frac{3 \cdot \gamma}{d}$		γ – spez. Energie der Rekristallisationsfront d – mittlerer Durchmesser der Rekristallisationszentren
Hemmende Kräfte Krümmung der Rekristallisationsfront $p_r = \frac{2 \cdot \gamma}{r}$		γ – Krümmungsradius der Front, Zentrum als Kugel
Partikel vor der Rekristallisationsfront $p_P = \frac{3 \cdot f \cdot \gamma}{\bar{d}_P}$		$\bar{d}_P$ – mittlerer Durchmesser der Rekristallisationszentren

Schnellrekristallisation



I) Primärrekristallisation wird nur durch Gleichgewichtsseigerung beeinflußt	$P \gg 0$ $P = (P_N + P_L) - P_r$
II) Primärrekrist. wird zu Beginn nicht von Ausscheidg. gehemmt, mögliche Beeinflussg. fortgeschritt. Stadien	$P > 0$ $P = (P_N + P_L) - P_r$
III) Hemmg. der Primärrekrist. durch Ausscheidg. an neuen Korngrenzen	$P > 0; P = (P_N + P_L + P_C) - (P_r + P_P)$
IV) zusätzliche Hemmung durch Ausscheidung. an Versetzungen vor Rekristallisationsbeginn	$P > 0$ $P = (P_N + P_L + P_C) - (P_r + P_P)$
V) Rekristallisation „in situ" kontrolliert durch Koagulation der Teilchen	$P \lesssim 0$ $P = P_N - (P_r + P_P)$ $(P_r + P_P) \geq P_N$

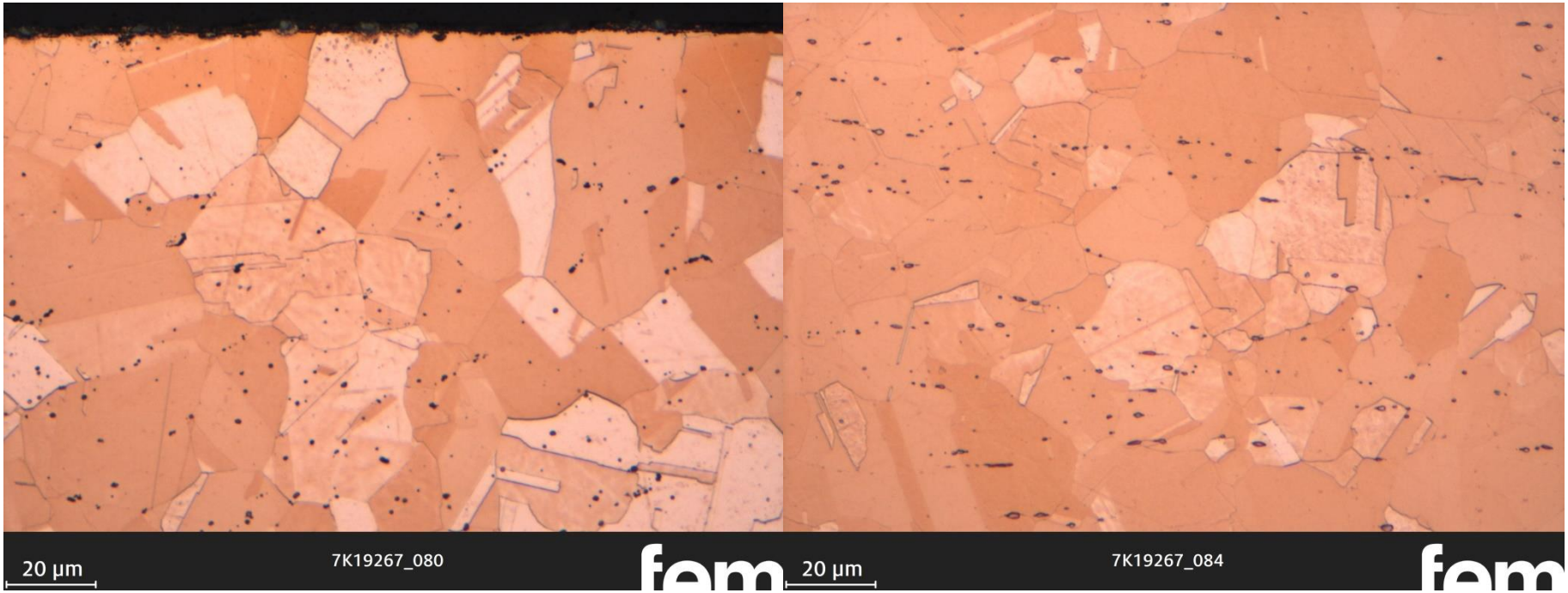
(nach Hornbogen, Köster u Kreye sowie Gorelik)

Schliffbilder - Walzdraht



ETP-Cu 8 mm Ausgangsdraht Quer- und Längsschliff

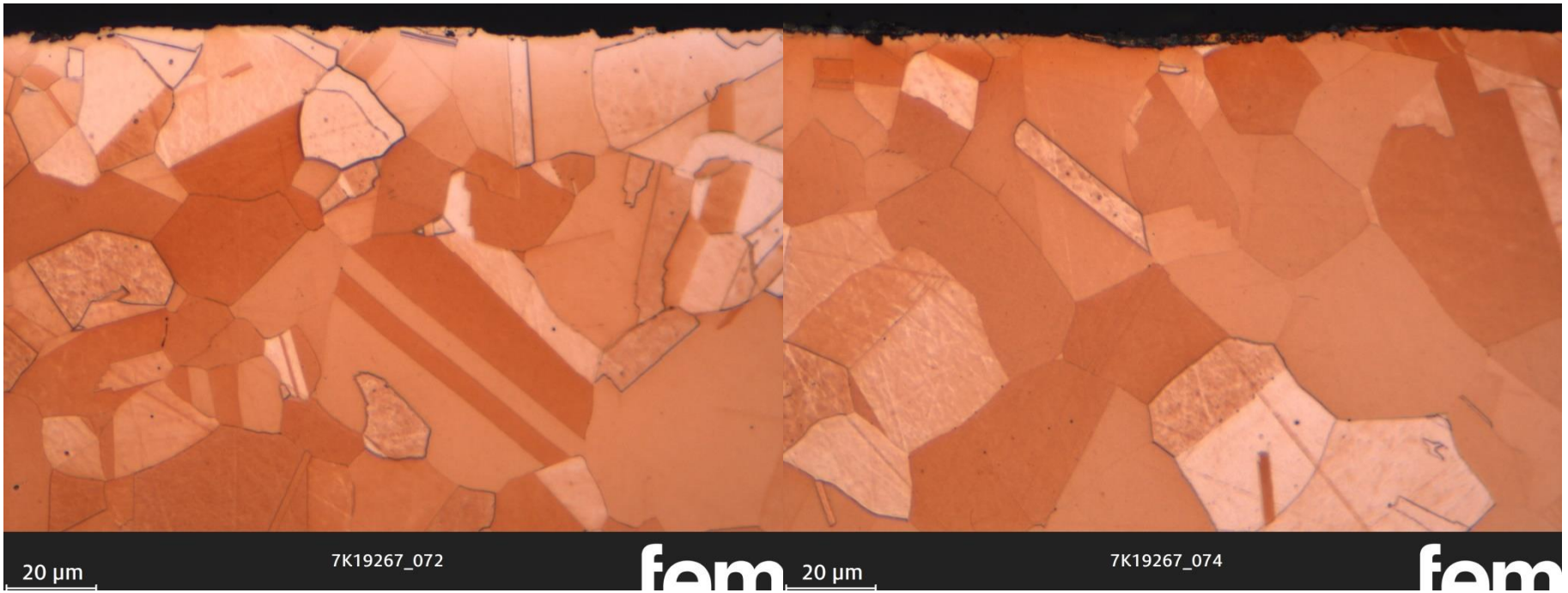
Dr. Rainer Menge



Schliffbilder - Walzdraht

OF-Cu 8 mm Ausgangsdraht Quer- und Längsschliff

Dr. Rainer Menge



Schliffbilder – Mitteldraht nach Widerstandsglühung



OF-Cu 0.64 mm Quer- und Längsschliff

Dr. Rainer Menge





Schliffbilder – Mitteldraht nach Widerstandsglühung



OF-Cu 2.5 mm Quer- und Längsschliff

Dr. Rainer Menge





Ableitung Energiebilanz



Dr. Rainer Menge

Stromwärme $\frac{I^2 \cdot \rho(\vartheta) \cdot dz}{A} \cdot dt = \gamma(\vartheta) \cdot c_w(\vartheta) \cdot A \cdot dz \cdot d\vartheta$ Joul´sche Wärme

$+\alpha \cdot u \cdot dz \cdot (\vartheta - \vartheta_U) \cdot dt$ Konvektion

$+\varepsilon \cdot \sigma \cdot u \cdot dz \cdot \left[(\vartheta + T)^4 - (\vartheta_U + T)^4 \right] \cdot dt$ Emission

Je nach Erwärmungsart wird die Wärme über Strom, Emission oder Konvektion eingetragen. In den Formeln sind Geometrie und Materialeigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur hinterlegt:

ρ – spezifischer elektrischer Widerstand
γ – Dichte
c_w – wahre spezifische Wärme
λ – Wärmeleitfähigkeit
α – Wärmeübergangszahl
ε – Emissionskoeffizient
σ – Boltzmann´sche Strahlungskonstante

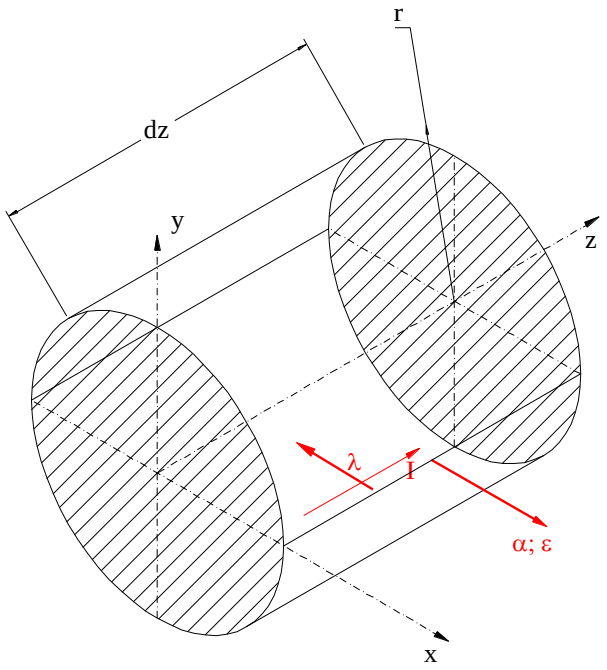
T – absolute Temperatur
θ – Temperatur
θ_U – Umgebungstemperatur
A – Querschnitt
u – Umfang
dz – Länge Volumenelement
dt – Intervallzeit

Umstellung nach $d\theta$, um iterativ zu rechnen.

$$d\vartheta = \frac{1}{\gamma(\vartheta) \cdot c_w(\vartheta)} \cdot \left[\frac{I^2 \cdot \rho(\vartheta)}{A^2} - \alpha \cdot \frac{u}{A} \cdot (\vartheta - \vartheta_U) \cdot dt - \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{u}{A} \cdot \left[(\vartheta + T)^4 - (\vartheta_U + T)^4 \right] \right] \cdot dt$$

Ableitung für Runddraht

η-Wirkungsgrad



$$u = 2 \cdot \pi \cdot r$$

$$A = \pi \cdot r^2$$

$$d\vartheta = \frac{1}{\gamma(\vartheta) \cdot c_w(\vartheta)} \cdot \begin{bmatrix} \frac{I^2 \cdot \rho(\vartheta)}{(\pi \cdot r^2)^2} \\ -\alpha \cdot \frac{2}{r} \cdot (\vartheta - \vartheta_U) \cdot dt \\ -\varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{2}{r} \cdot \left[(\vartheta + T)^4 - (\vartheta_U + T)^4 \right] \end{bmatrix} \cdot dt$$

$$d\vartheta = \frac{\eta}{\gamma(\vartheta) \cdot c_w(\vartheta)} \cdot \left[\frac{I^2 \cdot \rho(\vartheta)}{(\pi \cdot r^2)^2} \right] \cdot dt$$

$$d\vartheta = \frac{\eta}{\gamma(\vartheta) \cdot c_w(\vartheta)} \cdot \left[\frac{I^2 \cdot \rho(\vartheta)}{(\pi \cdot r^2)^2} \right] \cdot \frac{dx}{v}$$

$$\int_{\vartheta_0}^{\vartheta_E} \frac{\gamma(\vartheta) \cdot c_w(\vartheta)}{\rho(\vartheta)} \cdot d\vartheta = \eta \cdot \frac{I^2}{(\pi \cdot r^2)^2 \cdot v} \cdot \int_0^{l_{Glüh}} dx$$

$$const = \eta \cdot \frac{I^2}{(\pi \cdot r^2)^2} \cdot \frac{l_{Glüh}}{v}$$

$$R = \frac{\int_{\vartheta_0}^{\vartheta_E} \rho(\vartheta)}{\vartheta_E - \vartheta_0} \cdot \frac{l_{Glüh}}{(\pi \cdot r^2)} = \frac{U}{I}$$

$$I = \frac{k_I}{\eta} \cdot (\pi \cdot r^2) \cdot \sqrt{\frac{v}{l_{Glüh}}}$$

$$U = \frac{\int_{\vartheta_0}^{\vartheta_E} \rho(\vartheta)}{\vartheta_E - \vartheta_0} \cdot \frac{l_{Glüh}}{(\pi \cdot r^2)} \cdot \frac{k_I}{\eta} \cdot (\pi \cdot r^2) \cdot \sqrt{\frac{v}{l_{Glüh}}}$$

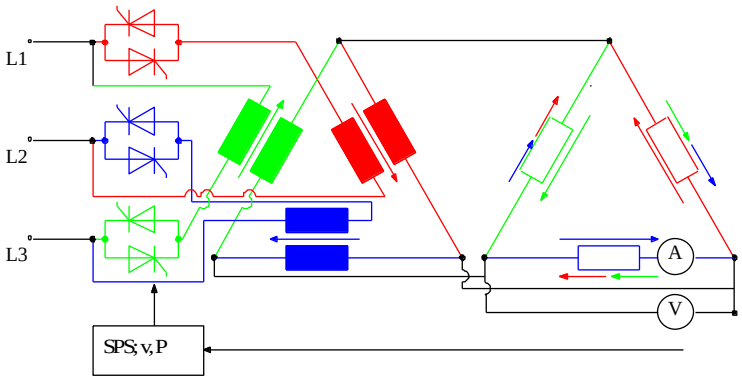
$$U = \frac{\int_{\vartheta_0}^{\vartheta_E} \rho(\vartheta)}{\vartheta_E - \vartheta_0} \cdot \frac{k_I}{\eta} \cdot \sqrt{v \cdot l_{Glüh}}$$

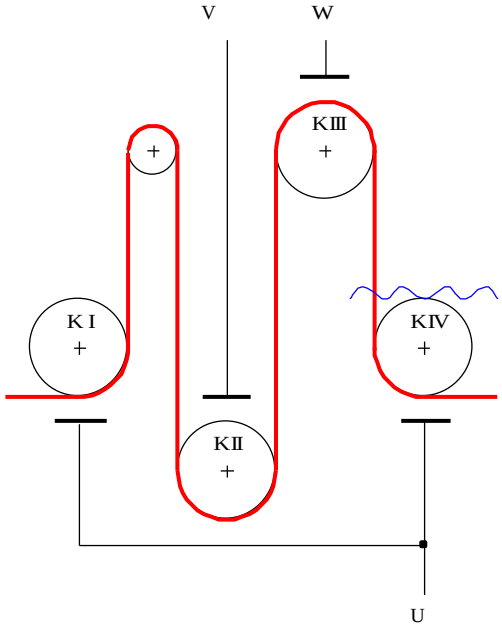
$$U = \frac{k_U}{\eta} \cdot \sqrt{v \cdot l_{Glüh}}$$

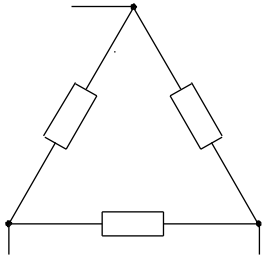
Abschätzung Walzdraht



Dr. Rainer Menge





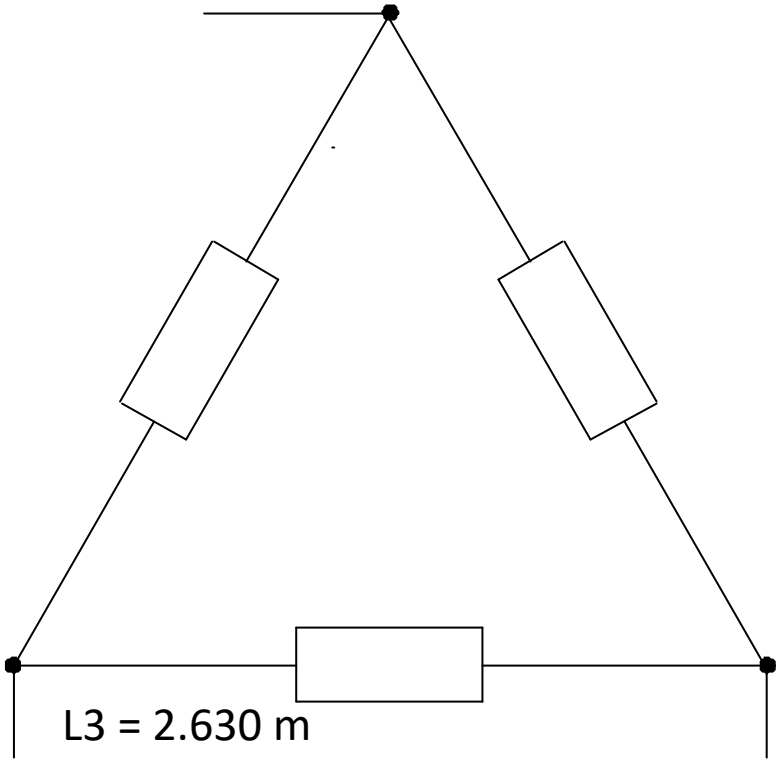


Abschätzung Glühparameter



Dr. Rainer Menge

Walzdraht offenes Dreieck
d = 1.8 mm
v = 40 m/s



L1 = 5.392 m
θ0 = 50 °C
θ1 = 220 °C
R1 = 53.752 mΩ
U1= 59 V
I1 = 1099 A
P1 = 64.9 kW
θp1 = 1263 K/s

L2 = 3.707 m
θ1 = 211 °C
θ2 = 376 °C
R2 = 52.682 mΩ
U2= 59 V
I2 = 1121 A
P2 = 66.2 kW
θp2 = 1677 K/s

L3 = 2.630 m
θ2 = 356 °C
θ3 = 514 °C
R3 = 48.945 mΩ
U3= 59 V
I3 = 1209 A
P3 = 71.5 kW
θp3 = 2095 K/s

k_U = 9.34 V/√(m/s)
P_{ges} = 202.6 kW

Phasenanschnitts-Steuerung + Oberwellen



Fourier-Zerlegung für periodische Funktionen

Dr. Rainer Menge

$$i = 0,1 \ldots i_{max}$$

$$i_{max} = 360$$

$$\varphi_i = \frac{\pi}{180} \cdot i$$

$$j = 0,1 \ldots j_{max}$$

$$j_{max} = 180$$

$$\alpha_j = \frac{\pi}{180} \cdot j$$

$$k = 0,1 \ldots k_{max}$$

$$k_{max} = 10$$

$$f1_k = f \cdot (2 \cdot k + 1)$$

$$u1(\varphi, \alpha) = \text{wenn}\left((0 \le \varphi < \pi - \alpha) \cup (\pi \le \varphi < 2 \cdot \pi - \alpha), \sin(\varphi), 0\right)$$

$$a1_{j,k} = \frac{\int_0^{\pi-\alpha_j} u1(\varphi, \alpha) \cdot \cos\left((2 \cdot k + 1) \cdot \varphi\right) \cdot d\varphi + \int_{\pi}^{2 \cdot \pi - \alpha_j} u1(\varphi, \alpha) \cdot \cos\left((2 \cdot k + 1) \cdot \varphi\right) \cdot d\varphi}{2 \cdot \pi}$$

$$b1_{j,k} = \frac{\int_0^{\pi-\alpha_j} u1(\varphi, \alpha) \cdot \sin\left((2 \cdot k + 1) \cdot \varphi\right) \cdot d\varphi + \int_{\pi}^{2 \cdot \pi - \alpha_j} u1(\varphi, \alpha) \cdot \sin\left((2 \cdot k + 1) \cdot \varphi\right) \cdot d\varphi}{2 \cdot \pi}$$

$$U1_{i,j} = 2 \cdot \sum_{k=0}^{k_{max}} \left(a1_{j,k} \cdot \cos\left((2 \cdot k + 1) \cdot \varphi_i\right) + b1_{j,k} \cdot \sin\left((2 \cdot k + 1) \cdot \varphi_i\right)\right)$$

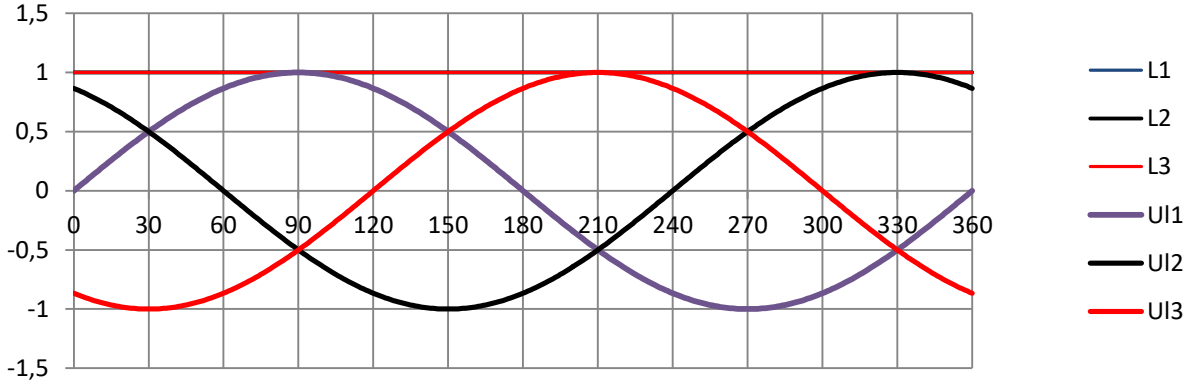


α = 0°

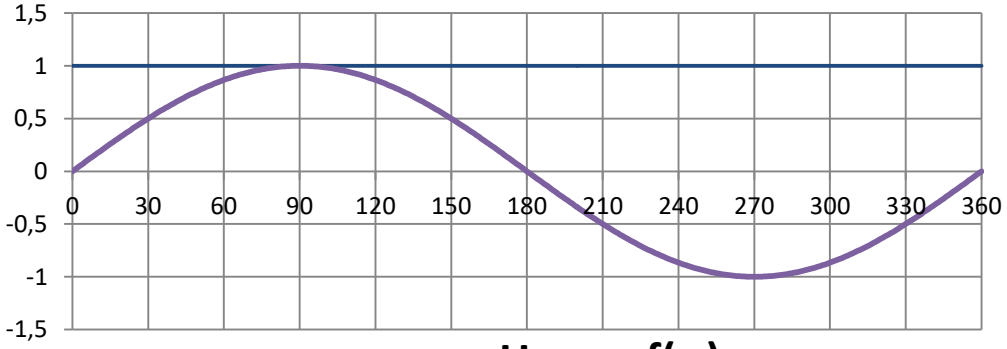
Siehe Excel-Tabelle

Dr. Rainer Menge

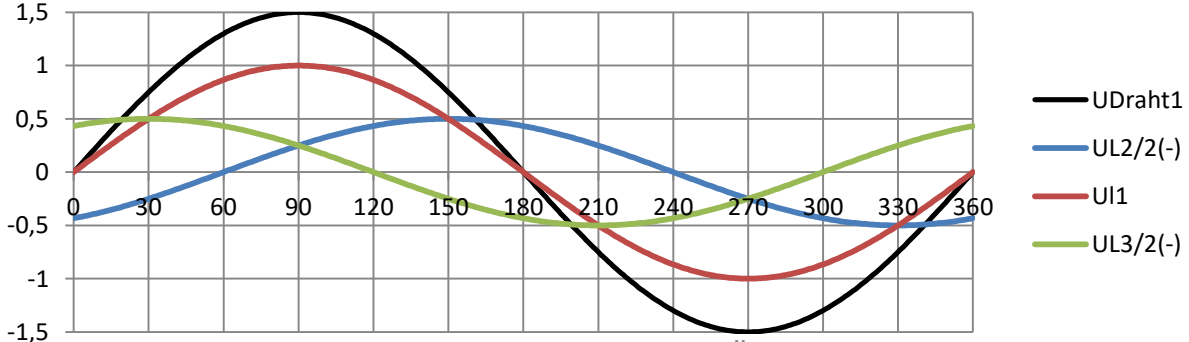
U=f(α)



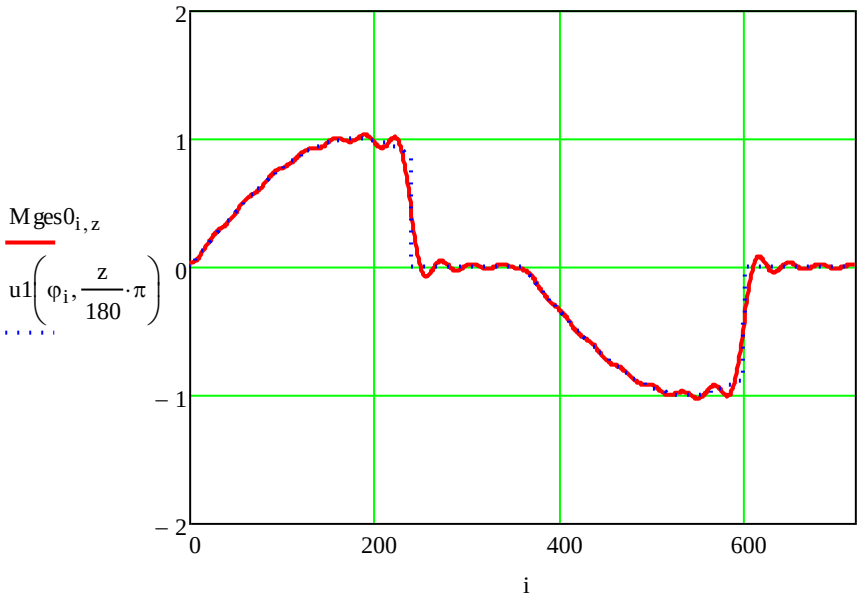
U1=f(α)

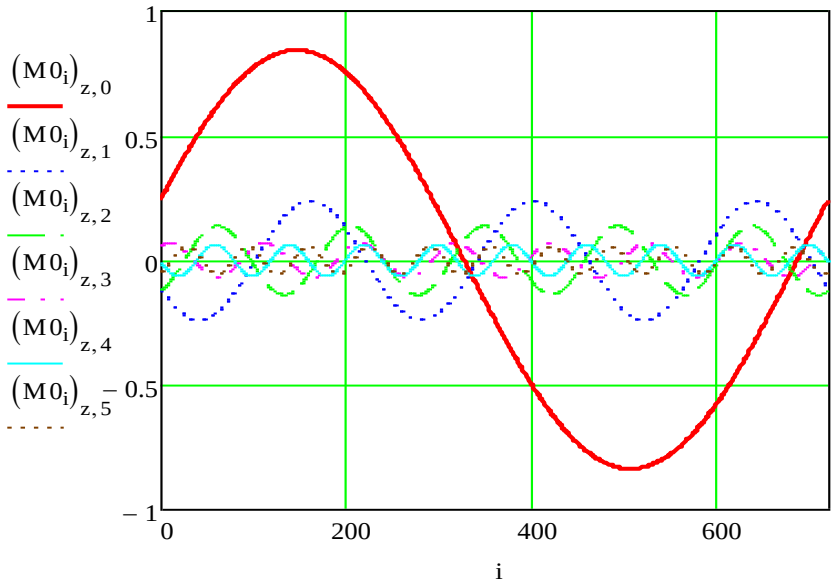


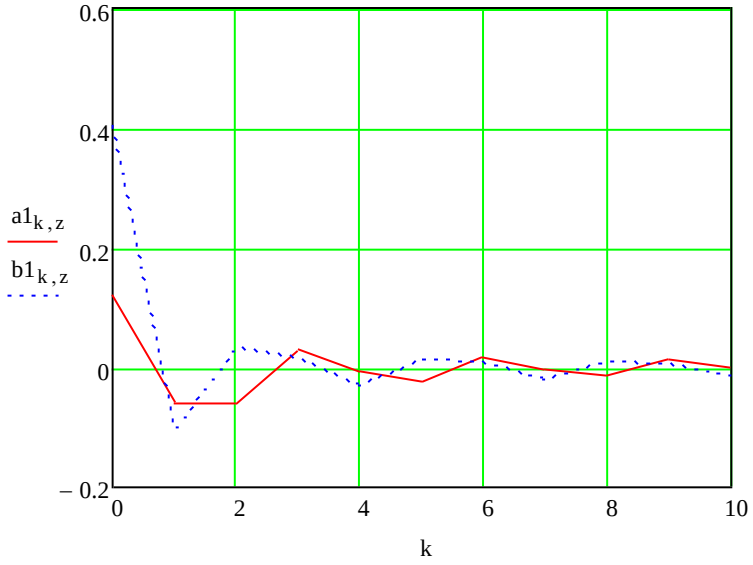
U_{Draht1}=f(α)



Spannungskurven





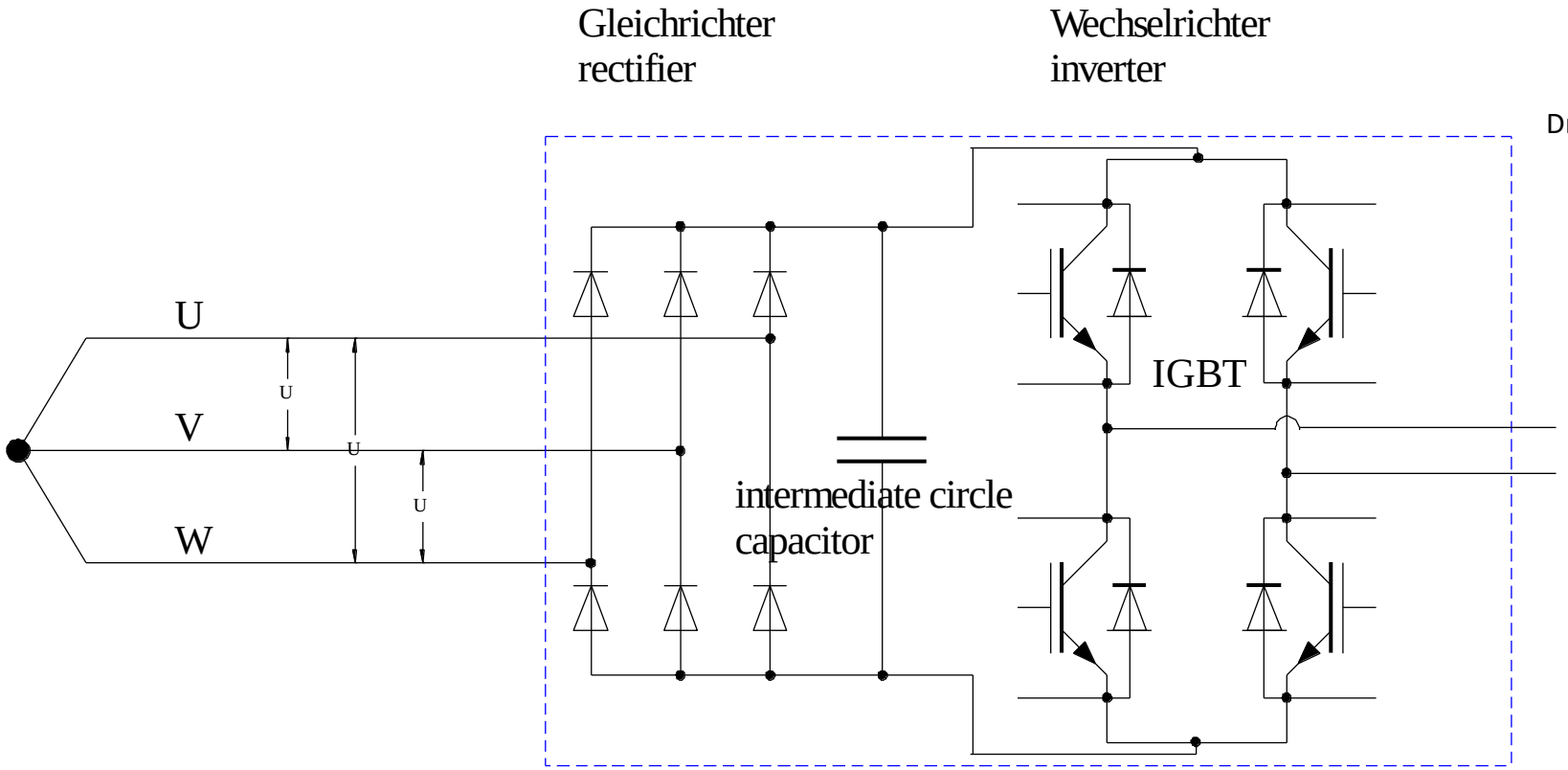


Dr. Rainer Menge

Umrichter



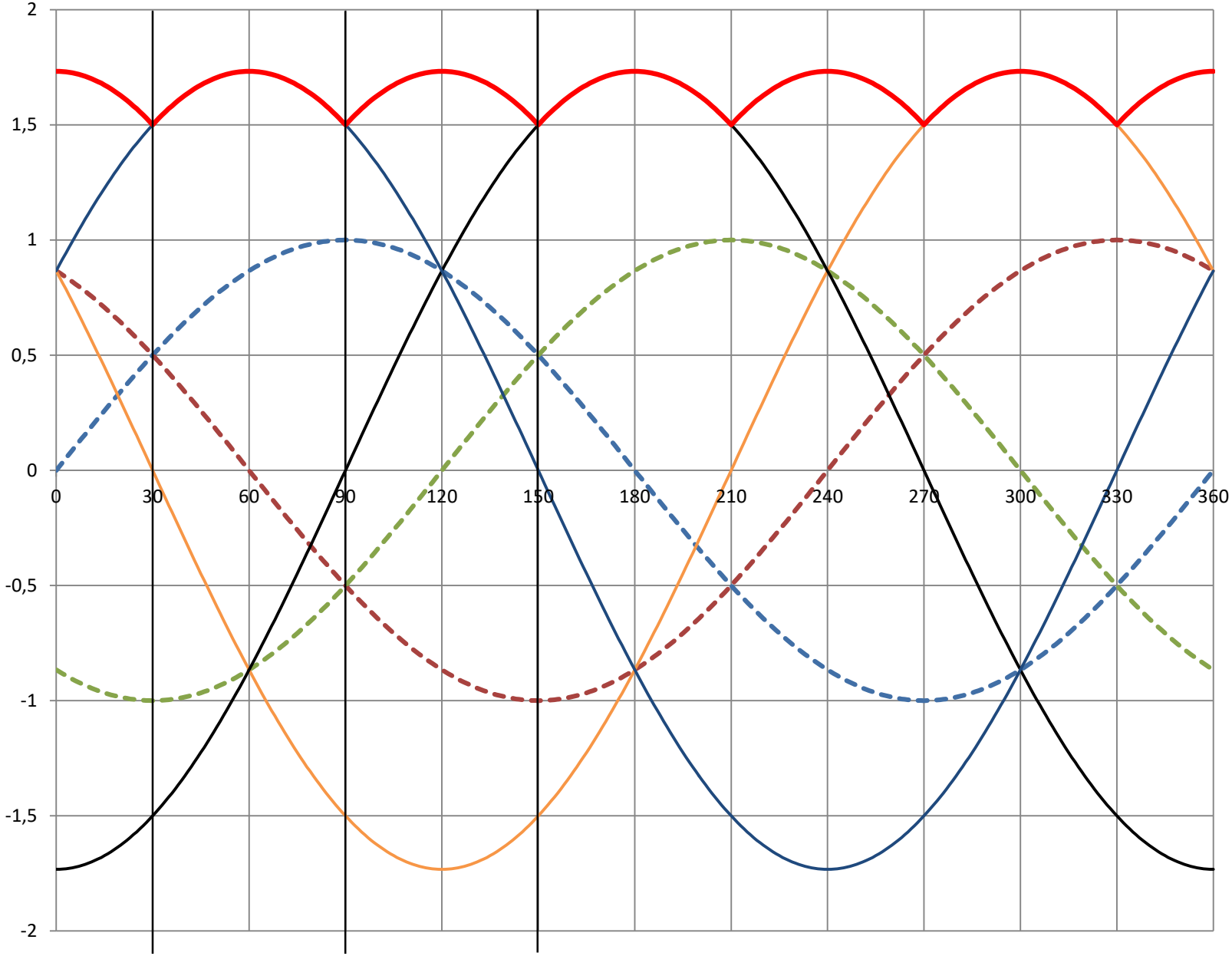
Dr. Rainer Menge



B6-Brücke

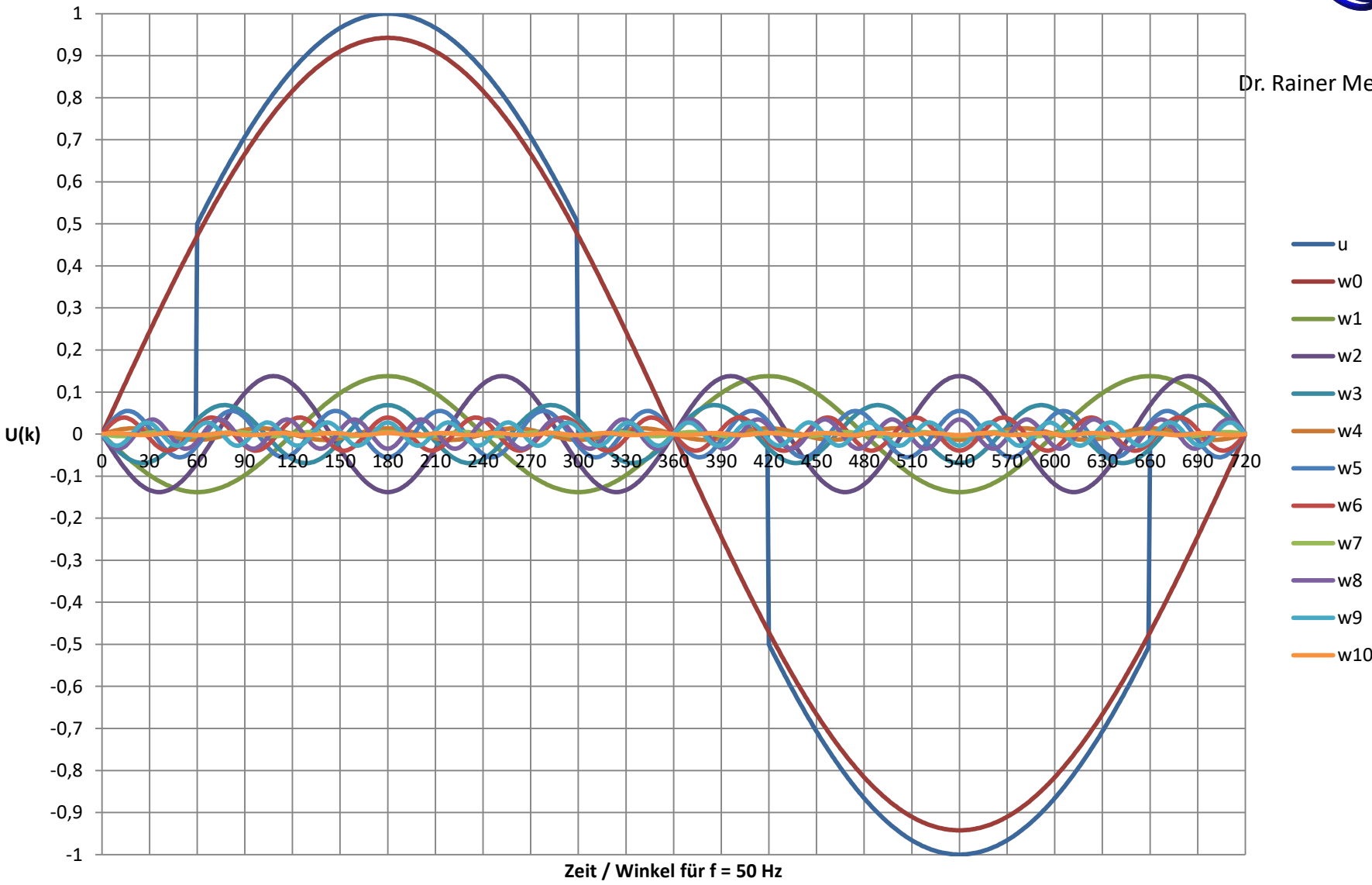


Dr. Rainer Menge





Dr. Rainer Menge



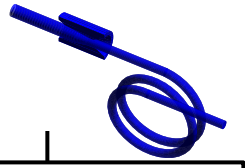
Übersicht Glühentypen

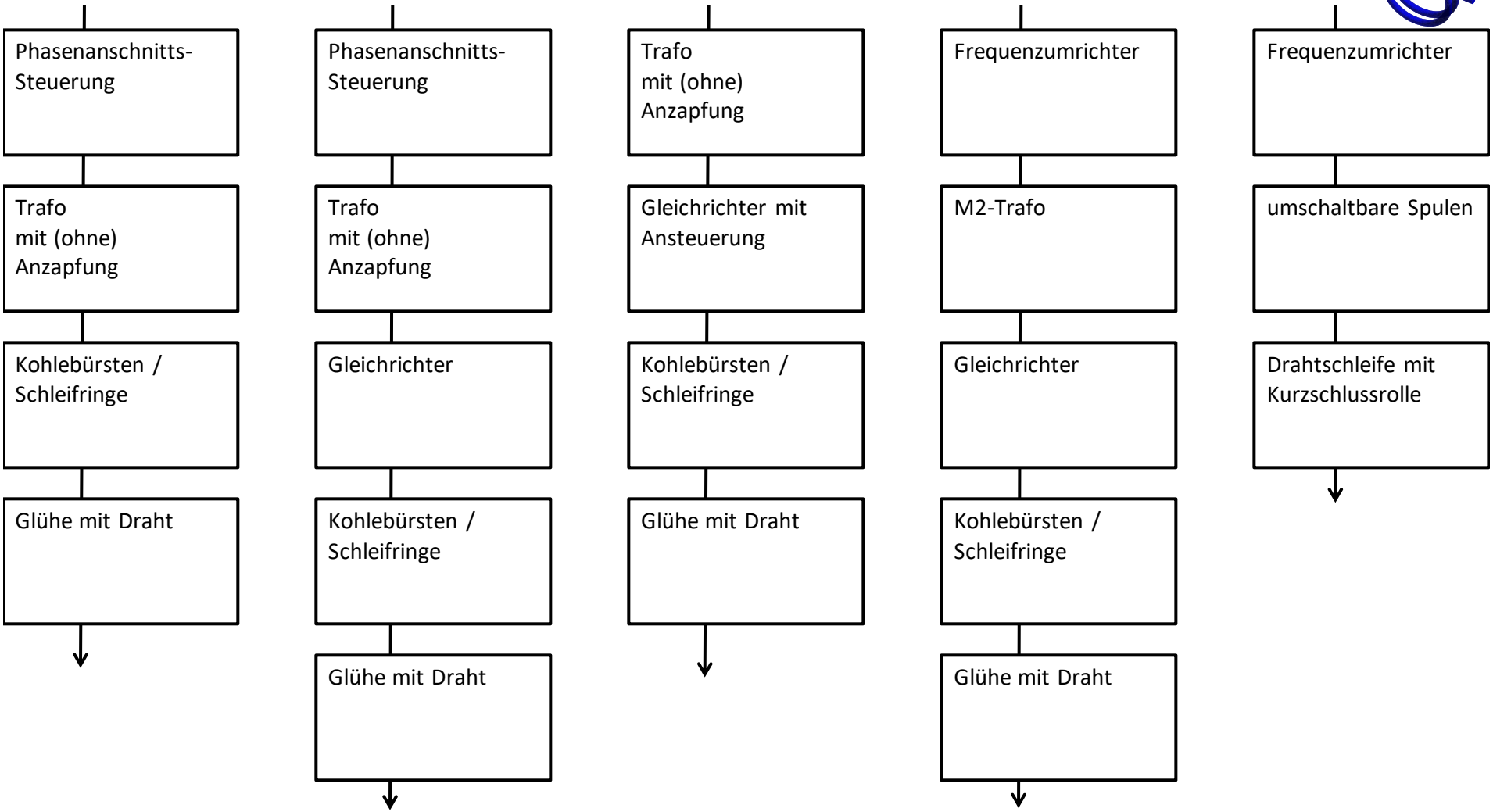


Dr. Rainer Menge

Drehstrom	Gleichstrom	
1-Draht	1-Draht	
2-Draht	Mehrdraht	4; 6; 8; **12; 16; 24; 32**; 40; 48; 56
3-Draht		
4-Draht		
Grobdraht	Grobdraht	Material
(Walzdraht)	Mitteldraht	E-Cu; OF-Cu; Al; Al-Legierungen
	Feindraht	
	Feinstdraht	

Varianten Aufbau

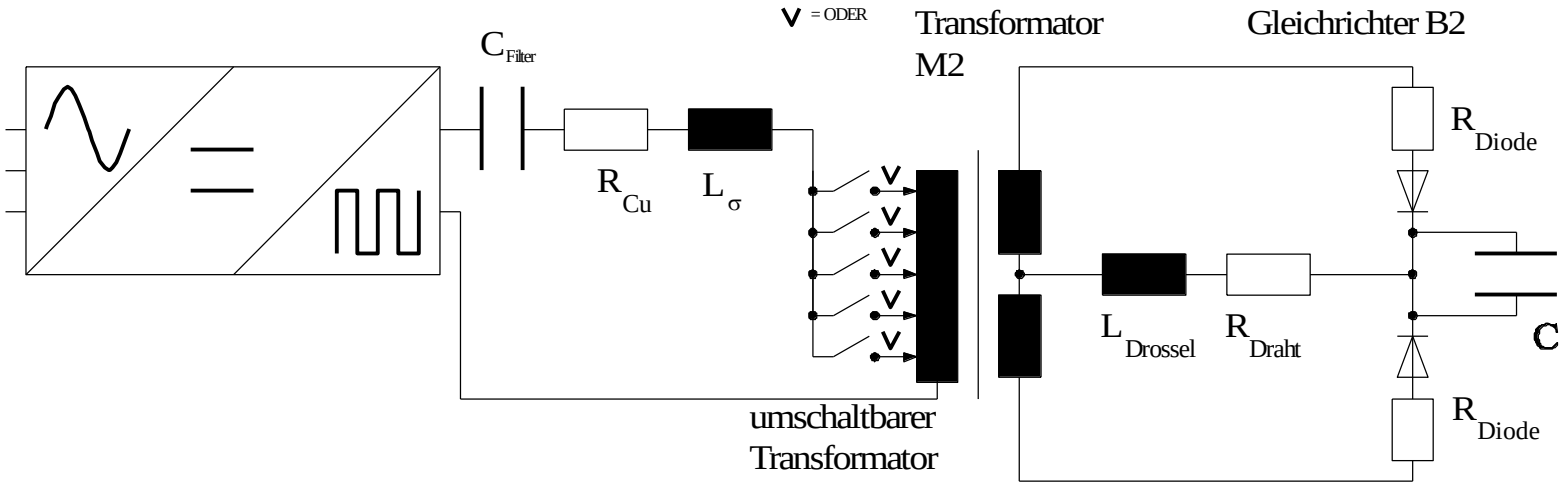


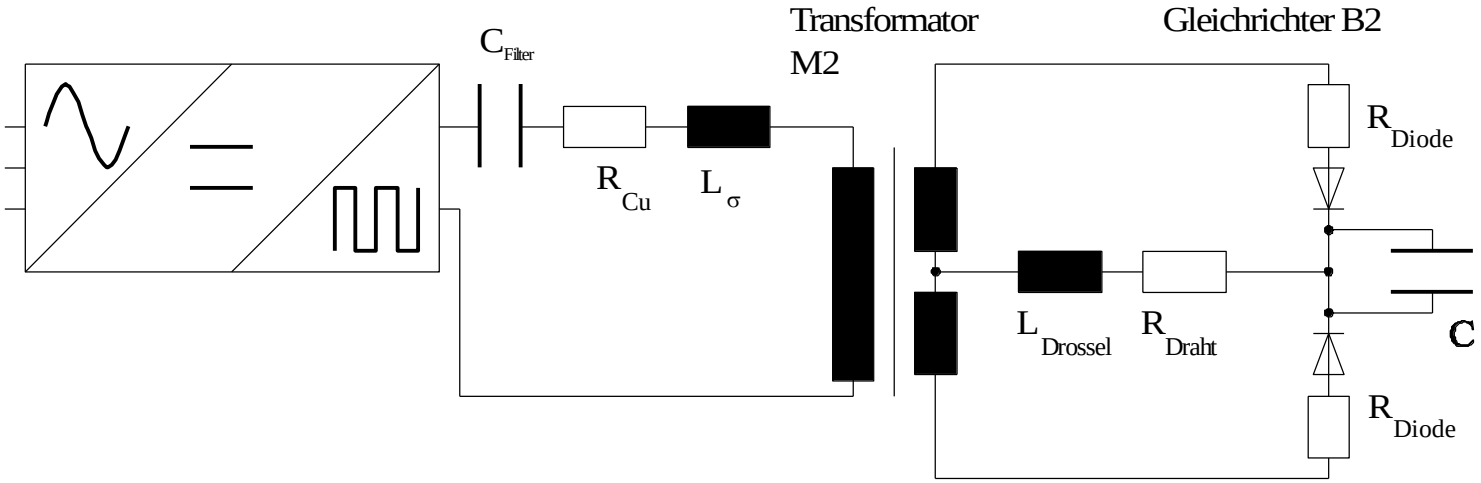


Ersatzschaltung FU- M2

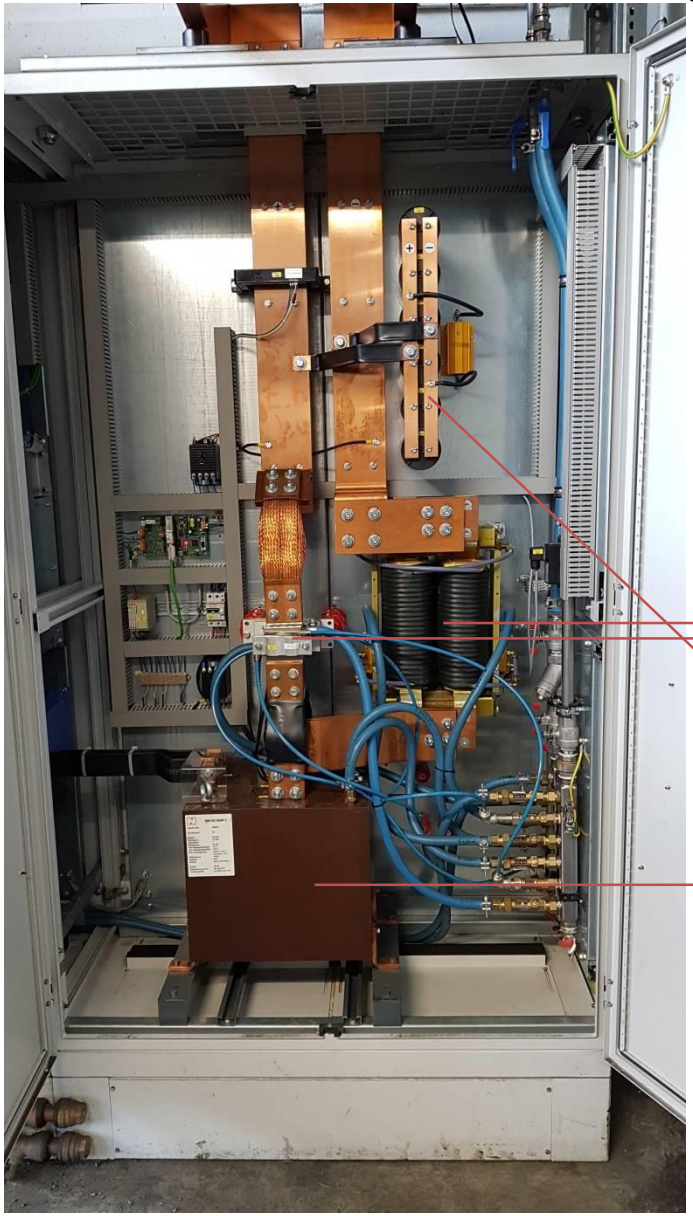


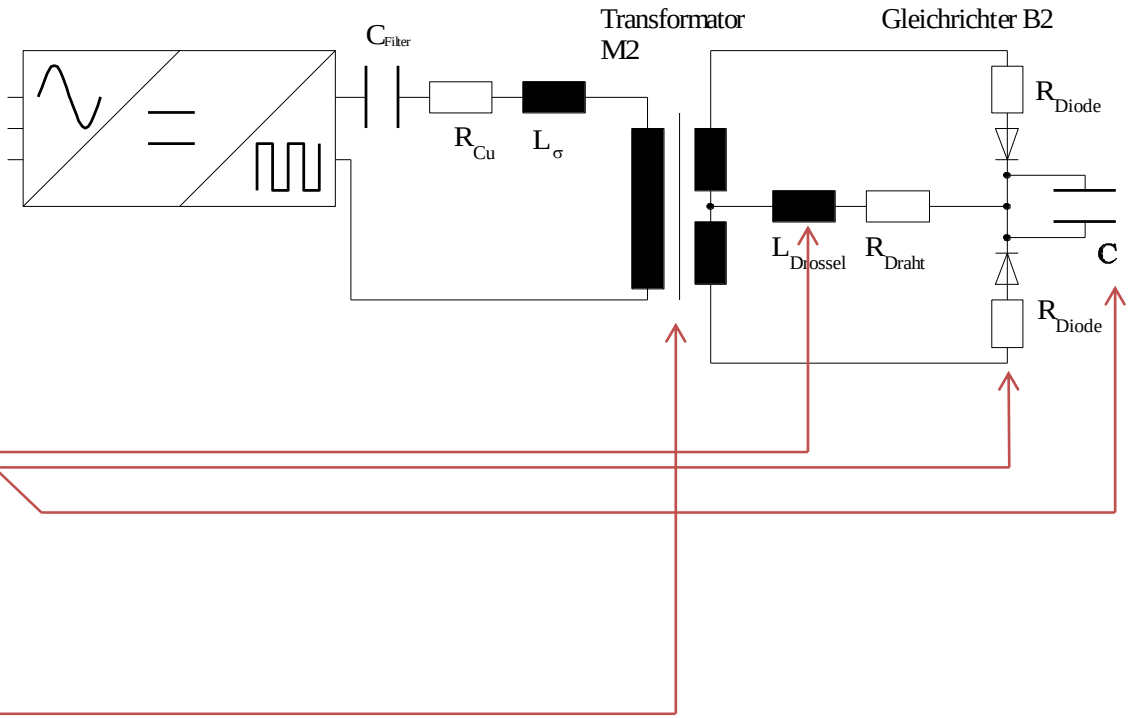
Dr. Rainer Menge





Schaltschrank Widerstandsglühe Mehrdraht mit M2-Trafo

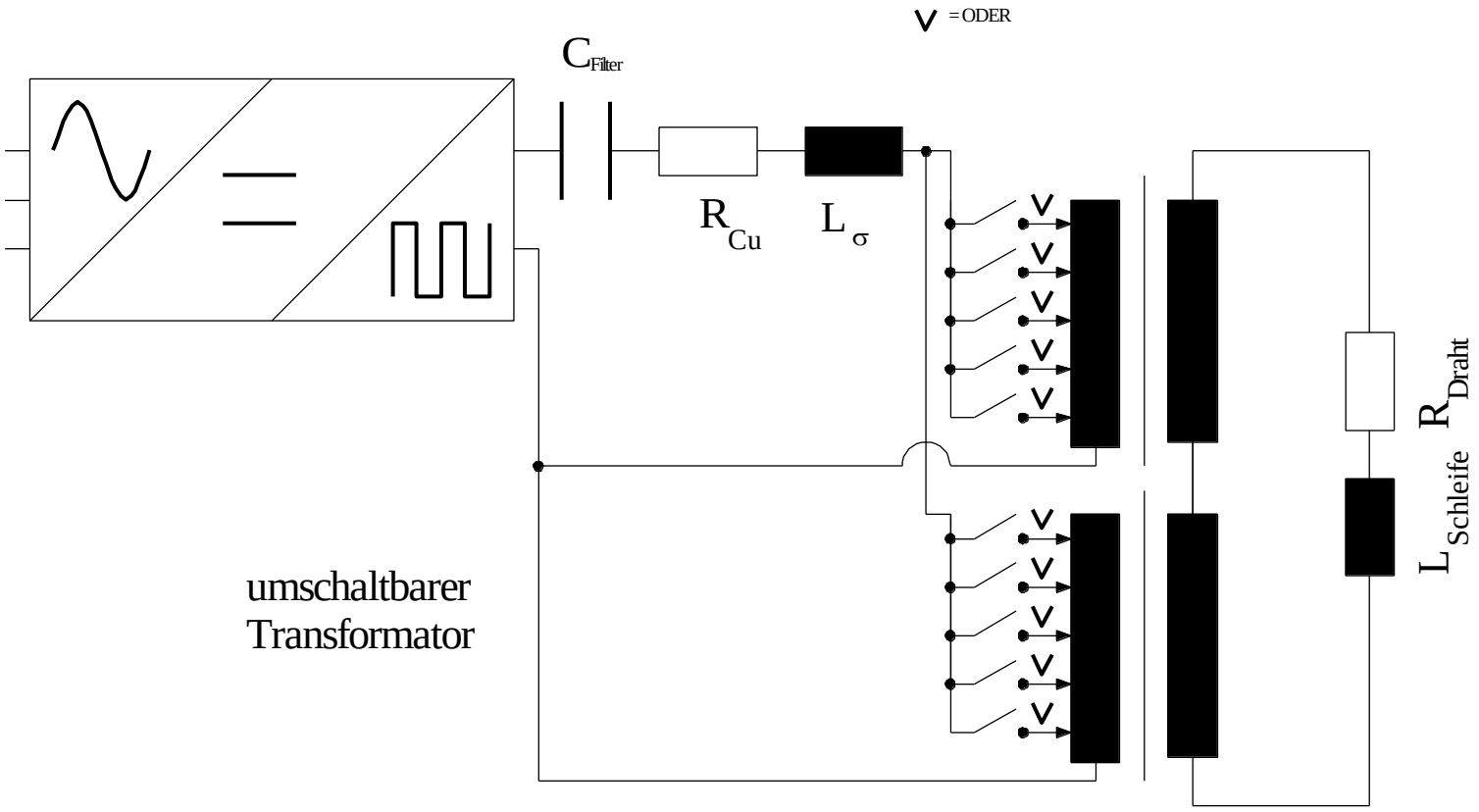




Induktionsglühe für Walzdraht



Dr. Rainer Menge



Zusammenfassung



Dr. Rainer Menge

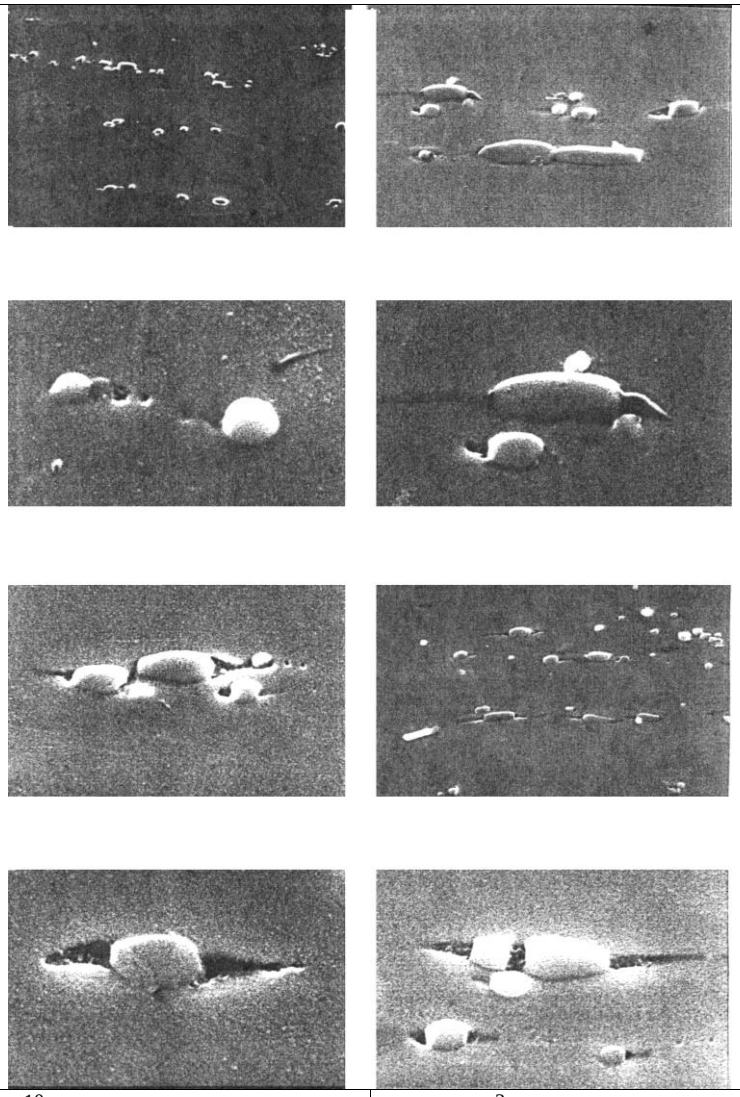
1. Anlagen zur Herstellung von Kupfervordraht
   - Properzi
   - Contirod
   - Southwire
   - Dipforming
   - Upcast
   - Rautomead
   - Conform

2. Kupfer und Schnellwärmebehandlung
   - Erfahrungen und technische Parameter

3. Widerstands- und Induktionsglühen
   - Oberwellen
   - Neue Entwicklungen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Oxide



10 µm	3 µm
1 µm	1 µm
1 µm	3 µm
1 µm	1 µm

O



o



Induktionsglühe





Dr. Rainer Menge