

# Die Berechnung ruckfreier Nocken für Verbrennungsmotoren

Frank Rieg

20. Juli 2022

## 1 Allgemeines

Die Kontur von Nocken für die Steuerung des Ventiltriebs von Verbrennungsmotoren kann auf verschiedenen Wegen gewonnen werden:

1. Messen vorhandener, bewährter Nocken.
2. Übernahme von Tabellen aus dem Schrifttum, z.B. [3].
3. Konstruktion des Nockens aus Kreisbögen bzw. Tangenten, z.B. [1] und [3]. Hier ist es aber sehr wahrscheinlich, dass im Beschleunigungsverlauf unerwünschte Sprünge, die zu Belastungsstößen führen, auftreten.
4. Berechnung und Auslegung von ruckfreien Nocken: Hier treten nur noch Knicke, aber keine Sprünge mehr in der Beschleunigungskurve auf. Hier sind verschiedene Verfahren bekannt geworden. Ein zwar älteres, aber sehr bewährtes und etabliertes Verfahren geht auf Dipl.-Ing. Dietrich Kurz und Dipl.-Ing. Wolf-Dieter Bensinger, beide (damals) Daimler-Benz AG, zurück, das hier kurz beschrieben werden soll, damit man den Hintergrund der beiden Programme CAM\_KUBE (für Kurz/Bensinger) und CAM\_HAPE für MS Windows versteht. Die Benutzung dieser beiden Programme des Autors wird ab S.5 beschrieben.

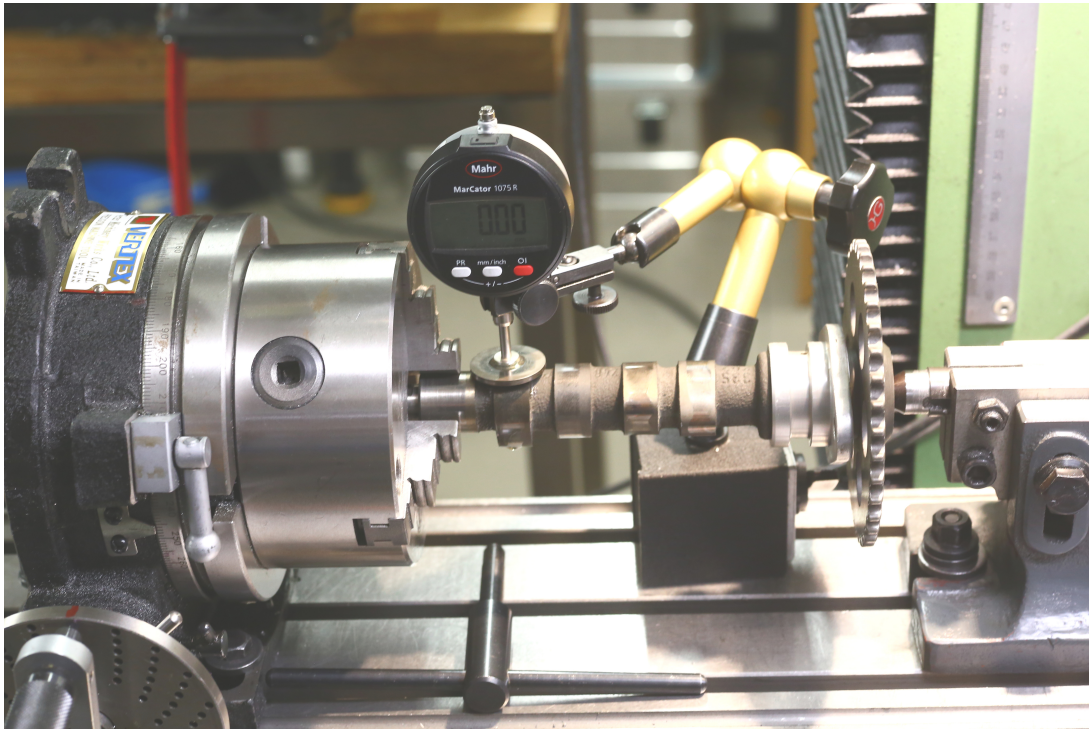


Abbildung 1: Messen eines Nockens auf einer BMW-Nockenwelle.

Hub = 8,5

1  $\alpha = 43^\circ$

Verz. ~ 2560

105 0.0

104 0.0006

103 0.0023

102 0.0052

101 0.0092

100 0.0143

99 0.0205

98 0.0279

97 0.0362

96 0.0456

95 0.0561

94 0.0674

93 0.0798

92 0.0930

91 0.1070

90 0.1218

89 0.1374

88 0.1536

87 0.1705

44 4.4784

43 4.6494

42 4.8173

41 4.9822

40 5.1438

39 5.3022

38 5.4573

37 5.6090

36 5.7573

35 5.9021

34 6.0433

33 6.1810

32 6.3151

31 6.4455

30 6.5722

29 6.6951

28 6.8143

27 6.9297

26 7.0410

Hub = 8,05

2  $\alpha = 39^\circ$

Verz. ~ 2000

110 0.0

108 0.0031

106 0.0161

104 0.0352

102 0.0552

100 0.0751

98 0.0950

96 0.1149

94 0.1349

92 0.1548

90 0.1747

88 0.1946

86 0.2145

84 0.2345

82 0.2544

80 0.2747

78 0.3015

76 0.3490

74 0.4270

45 4.4784

44 4.6494

43 4.8173

42 4.9822

41 5.1438

40 5.3022

39 5.4573

38 5.6090

37 5.7573

36 5.9021

35 6.0433

34 6.1810

33 6.3151

32 6.4455

31 6.5722

30 6.6951

29 6.8143

28 6.9297

27 7.0410

Hub = 9,2

3  $\alpha = 49^\circ$

Verz. ~ 3200

94 0.0

93 0.0005

92 0.0020

91 0.0044

90 0.0079

89 0.0123

88 0.0176

87 0.0239

86 0.0310

85 0.0390

84 0.0479

83 0.0575

82 0.0679

81 0.0789

80 0.0906

79 0.1029

78 0.1158

77 0.1290

76 0.1427

33 6.1653

32 6.3402

31 6.5103

30 6.6757

29 6.8363

28 6.9920

27 7.1427

26 7.2885

25 7.4293

24 7.5650

23 7.6956

22 7.8210

21 7.9412

20 8.0562

19 8.1658

18 8.2702

17 8.3692

16 8.4628

15 8.5510

Abbildung 2: Ausschnitt aus Tabellen des bekannten Buchs von Ludwig Apfelbeck, 13. Auflage, S.205 [3].

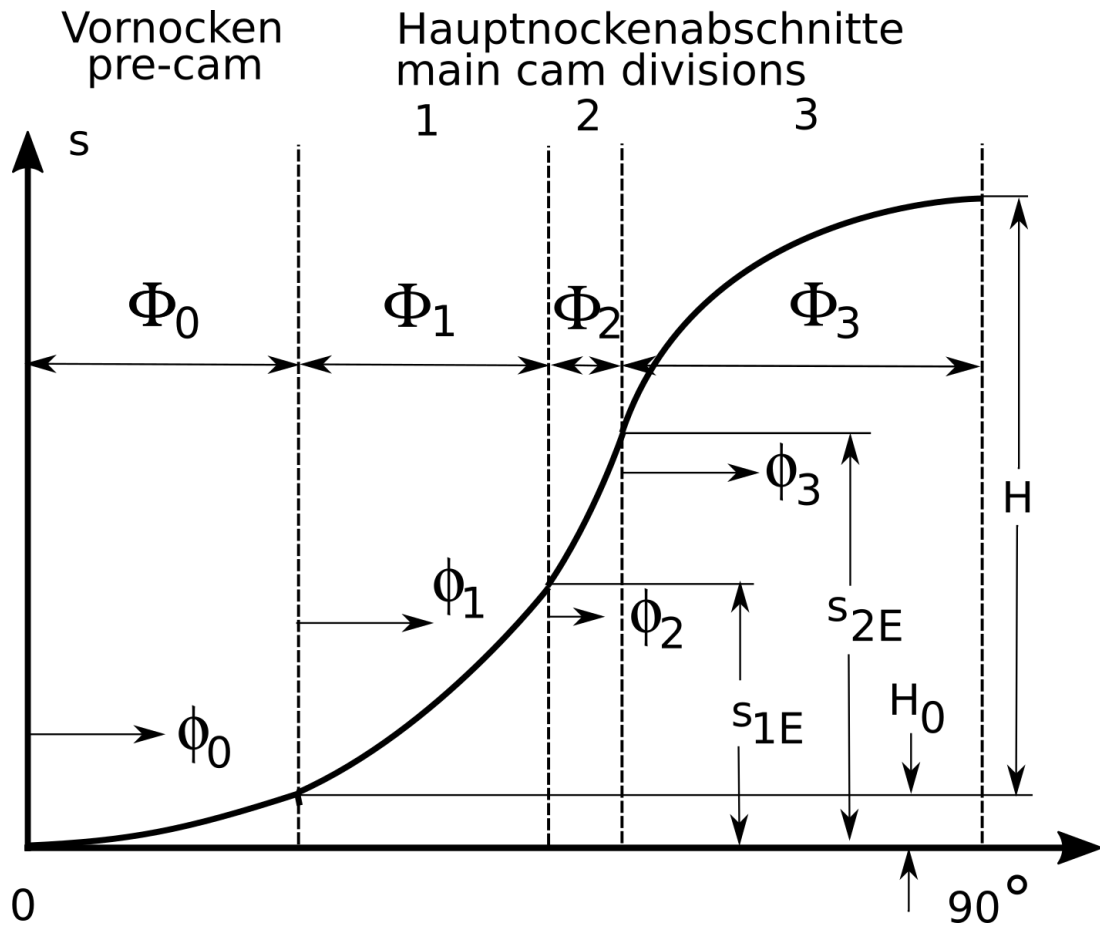


Abbildung 3: Wegkurve für einen ruckfreien Nocken nach [1] bzw. [2].

## 2 Theorie der Berechnung ruckfreier Nocken nach Kurz/Bensinger

Die Ventilerhebungskurve wird von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  definiert, von  $91^\circ$  bis  $180^\circ$  ist sie symmetrisch. Die Spitze der Ventilerhebungskurve ist bei  $90^\circ$ . Die Kurve wird nun innerhalb des Bereichs  $0^\circ$ - $90^\circ$  in mehrere Abschnitte zerlegt:

**0. Abschnitt**, der sog. *Vornockenbereich*. Er dient dazu, das Ventilspiel zu überbrücken und Nocken und Aufnehmer zur sauberen, kraftschlüssigen Anlage zu bringen: Von  $0^\circ$  bis zu einem Winkel  $\Phi_0$  mit dem laufenden Winkel  $\phi_0$  wird die Ventilerhebungskurve durch eine Sinuslinie einer viertel Periode abgebildet:

$$s_0 = H_0 \left( 1 - \cos \frac{\pi}{2\Phi_0} \phi_0 \right) \quad (1)$$

Die erste Ableitung ergibt den Geschwindigkeitsverlauf von  $0^\circ$  bis zu einem Winkel  $\Phi_0$ :

$$s'_0 = \frac{v_0}{\omega} = H_0 \frac{\pi}{2\Phi_0} \sin \frac{\pi}{2\Phi_0} \phi_0 \quad (2)$$

Die zweite Ableitung ergibt den Beschleunigungsverlauf von  $0^\circ$  bis zu einem Winkel  $\Phi_0$ :

$$s''_0 = \frac{v_0}{\omega^2} = H_0 \left( \frac{\pi}{2\Phi_0} \right)^2 \cos \frac{\pi}{2\Phi_0} \phi_0 \quad (3)$$

**1. Abschnitt**, der sog. *1.Hauptnockenbereich*: von  $\Phi_0$  bis zu einem Winkel  $\Phi_1$  mit dem laufenden Winkel  $\phi_1$  wird die Ventilerhebungskurve durch eine schiefe Sinuslinie einer halben Periode abgebildet:

$$s_1 = H_0 + c_{11}\phi_1 - c_{12} \sin \frac{\pi}{\Phi_1} \phi_1 \quad (4)$$

$$s'_1 = \frac{v_1}{\omega} = c_{11} - c_{12} \frac{\pi}{\Phi_1} \cos \frac{\pi}{\Phi_1} \phi_1 \quad (5)$$

$$s''_1 = \frac{a_1}{\omega^2} = c_{12} \left( \frac{\pi}{\Phi_1} \right)^2 \sin \frac{\pi}{\Phi_1} \phi_1 \quad (6)$$

**2. Abschnitt**, der sog. *2.Hauptnockenbereich*: von  $\Phi_0 + \Phi_1$  bis zu einem Winkel  $\Phi_2$  mit dem laufenden Winkel  $\phi_2$  wird die Ventilerhebungskurve durch eine schiefe Sinuslinie einer viertel Periode abgebildet:

$$s_2 = s_{1E} + c_{21}\phi_2 + c_{22} \sin \frac{\pi}{2\Phi_2} \phi_2 \quad (7)$$

$$s'_2 = \frac{v_2}{\omega} = c_{21} + c_{22} \frac{\pi}{2\Phi_2} \cos \frac{\pi}{2\Phi_2} \phi_2 \quad (8)$$

$$s''_2 = \frac{a_2}{\omega^2} = -c_{22} \left( \frac{\pi}{2\Phi_2} \right)^2 \sin \frac{\pi}{2\Phi_2} \phi_2 \quad (9)$$

**3. Abschnitt**, der sog. *3.Hauptnockenbereich*: von  $\Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2$  bis zu einem Winkel  $\Phi_3$  mit dem laufenden Winkel  $\phi_3$  wird die Ventilerhebungskurve durch ein Polynom 4.Grades abgebildet:



$$s_3 = s_{2E} + c_{31}(\Phi_3 - \phi_3)^4 - c_{32}(\Phi_3 - \phi_3)^2 + c_{33} \quad (10)$$

$$s'_3 = \frac{v_3}{\omega} = -4c_{31}(\Phi_3 - \phi_3)^3 + 2c_{32}(\Phi_3 - \phi_3) \quad (11)$$

$$s''_3 = \frac{a_3}{\omega^2} = 12c_{31}(\Phi_3 - \phi_3)^2 - 2c_{32} \quad (12)$$

Nun werden die Konstanten  $c$  berechnet (näheres dazu in [1]), und dabei gilt: Am Ende des einen und am Anfang des nächsten Nockenabschnitts müssen Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung gleich sein. Ferner wird am Ende des Vornockenabschnitts eine Geschwindigkeit  $s'_{0E}$  vorgegeben, und es muss gelten:  $s_{3E} = H_0 + H$ . Das Verhältnis  $\frac{\Phi_2}{\Phi_3}$  soll gemäß [1] zu 0,1 bis 0,15 gewählt werden.

### 3 Programme CAM\_KUBE u. CAM\_SHAPE zur Berechnung ruckfreier Nocken nach Kurz/Bensinger

Es wird das Beispiel aus [1], S.44ff zugrundegelegt:

$$\Phi_0 = 30^\circ, \Phi_1 = 18^\circ, \Phi_2 = 4^\circ, \Phi_3 = 38^\circ$$

$$H_0 = 0.3, H = 6.7, s'_{0E} = 0.9$$

Zusätzlich nehmen wir an: Grundkreisradius  $R_G = 14$

Die Eingabedatei für CAM\_KUBE und CAM\_SHAPE ist *f0.txt*, Abb. 4. Sie besteht aus drei Zeilen, wobei die Zeile 3 nicht gelesen wird; sie dient nur als Eingabehilfe. Für dieses Beispiel sieht sie wie in Abb. 4 aus. Dabei wird die Sprache in der ersten Zeile mit den Schlüsselworten GERMAN oder ENGLISH gewählt. In der Zeile 2 werden  $\Phi_0, \Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, H_0, H, s'_{0E} = v_{0E}$  und  $R_G$  in dieser Reihenfolge, durch jeweils mindestens ein Leerzeichen getrennt, eingegeben.

Sie öffnen eine Windows-Eingabeaufforderung und starten *CAM\_KUBE.*, s. Abb. 5.

Auf dem Bildschirm sehen Sie diverse Ausgaben, besonders wichtig sind die beiden Krümmungswerte, die auf keinen Fall negativ werden dürfen, s. Abb. 6.

Es werden die Ausgabedateien *f1.txt* und *f2.txt* erzeugt. *f1.txt*, s. Abb. 7, enthält Winkel, Weg sowie die *bezogenen* Werte für Geschwindigkeit und Beschleunigung.

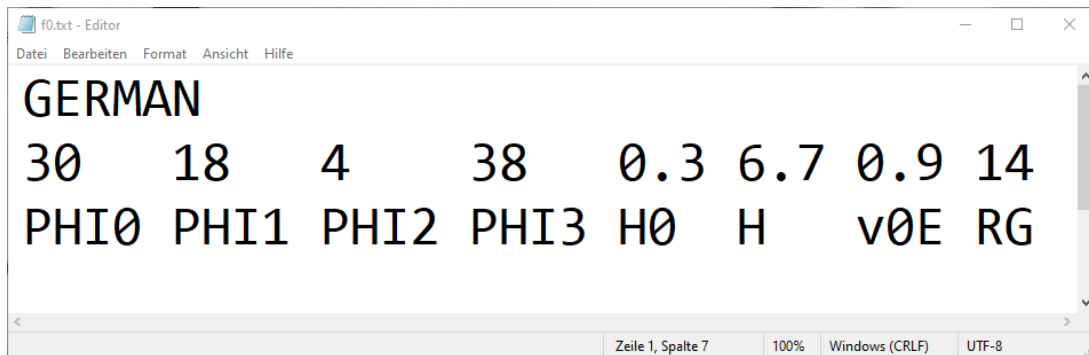


Abbildung 4: Eingabedatei f0.txt für das Beispiel aus [1], S.44ff.

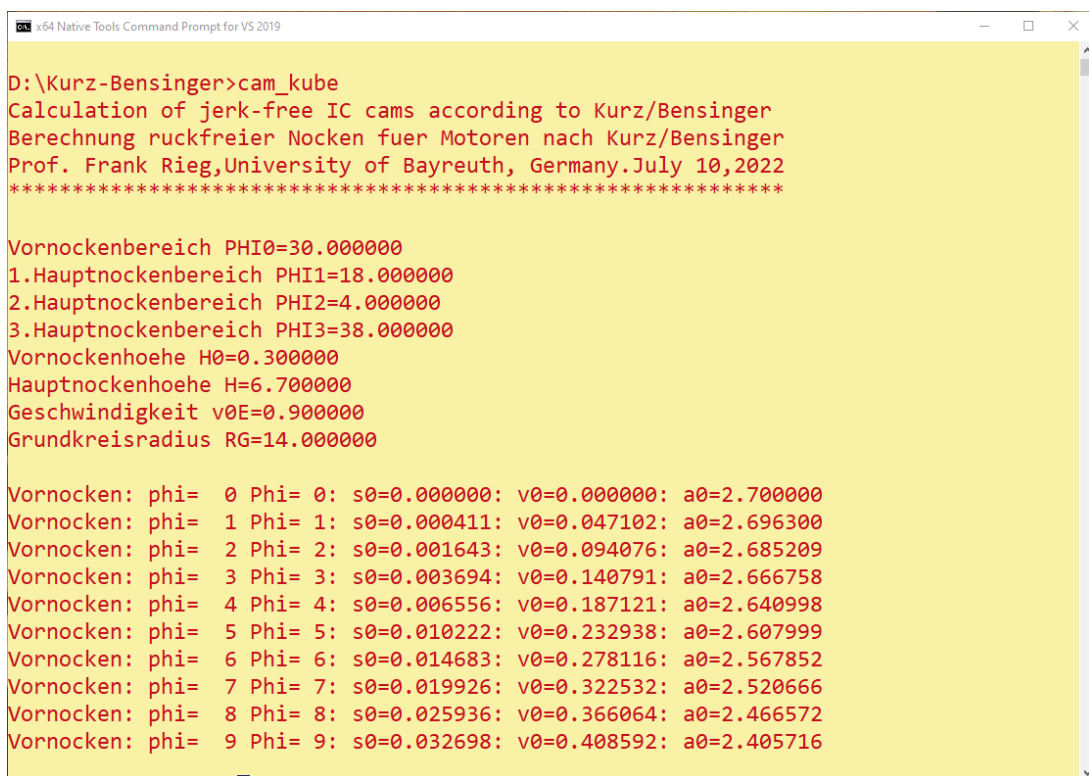


Abbildung 5: Die Bildschirmausgabe von *CAM\_KUBE*.

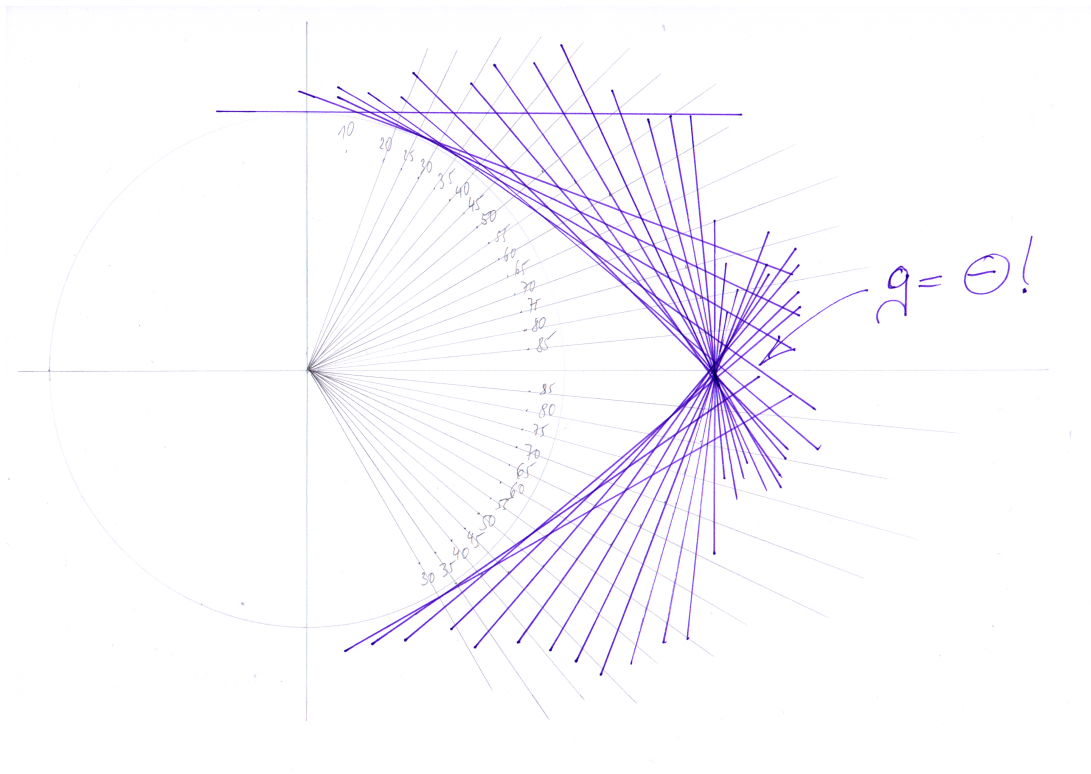


Abbildung 6: Der Krümmungsradius der Nockenspitze wird negativ!

phi	Weg s	v/omega	a/omega**2
0	+0.0000000E+00	+0.0000000E+00	+2.7000000E+00
1	+4.1114150E-04	+4.7102471E-02	+2.6962997E+00
2	+1.6434391E-03	+9.4075836E-02	+2.6852090E+00
3	+3.6935151E-03	+1.4079135E-01	+2.6667584E+00
4	+6.5557503E-03	+1.8712095E-01	+2.6409982E+00
5	+1.0222300E-02	+2.3293767E-01	+2.6079993E+00
6	+1.4683113E-02	+2.7811592E-01	+2.5678520E+00
7	+1.9925964E-02	+3.2253187E-01	+2.5206663E+00
8	+2.5936482E-02	+3.6606378E-01	+2.4665717E+00
9	+3.2698193E-02	+4.0859233E-01	+2.4057163E+00
10	+4.0103563E-02	+4.5000000E-01	+2.3383660E+00

Abbildung 7: Ausgabedatei f1.txt mit Winkel, Weg sowie bezogenen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen.

270+phi	90-phi	Fraestiefe
270	90	0.000000
272	88	0.001643
274	86	0.006556
276	84	0.014683
278	82	0.025936
280	80	0.040193
282	78	0.057295
284	76	0.077057
286	74	0.099261
288	72	0.123665
290	70	0.150001

Abbildung 8: Ausgabedatei f2.txt: Fräsdaten für tangentiales Fräsen.

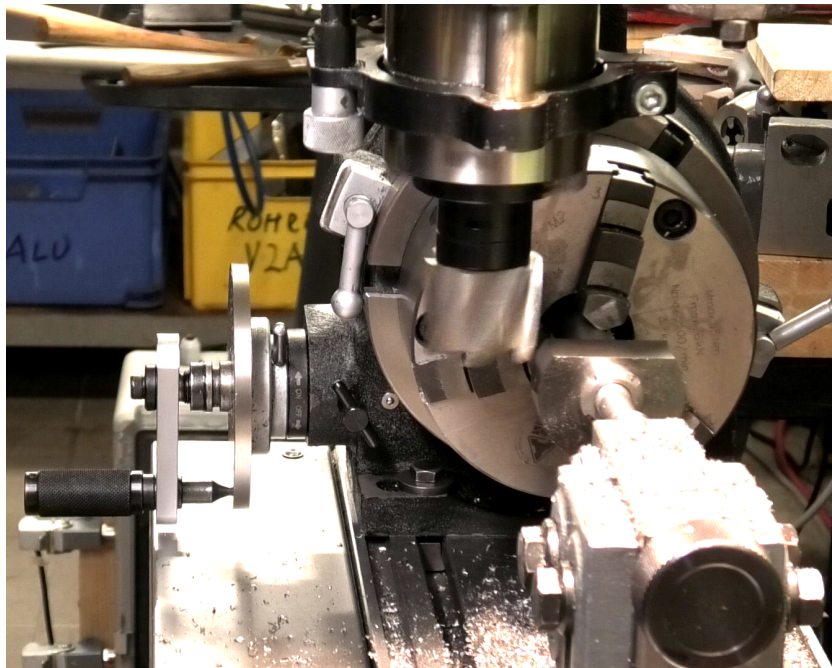


Abbildung 9: Tangentiales Fräsen des Nockens auf einer Universalfräsmaschine mit handelsüblichem Teilkopf.

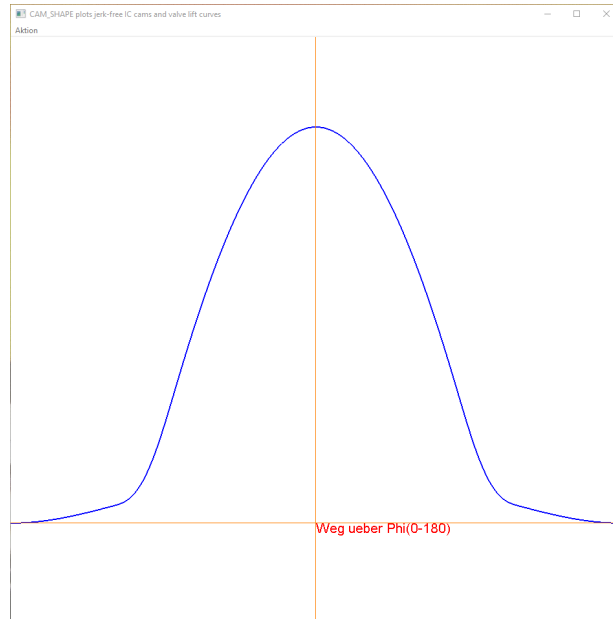


Abbildung 10: Wegverlauf beim Beispielnocken aus [1].

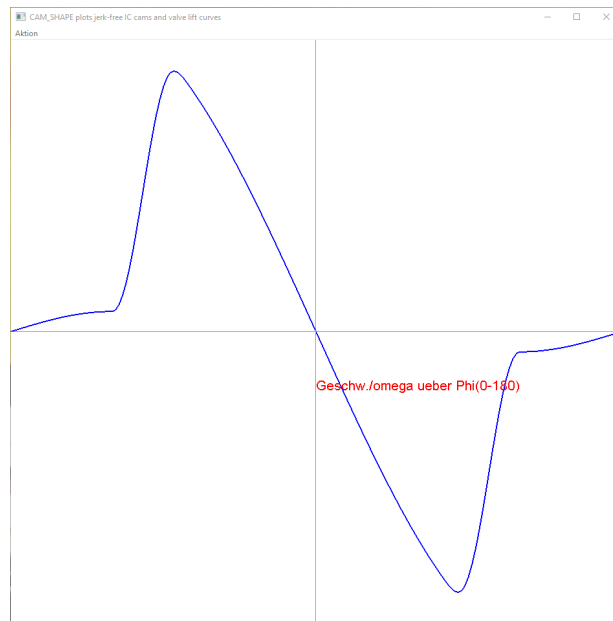


Abbildung 11: Geschwindigkeitsverlauf beim Beispielnocken aus [1].

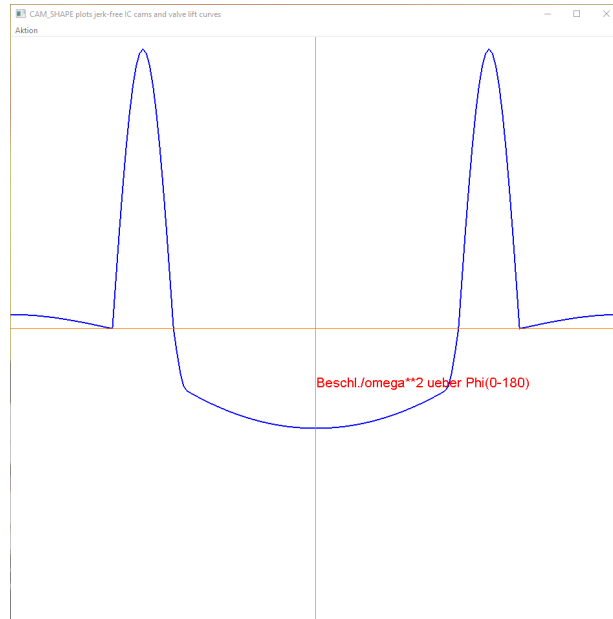


Abbildung 12: Beschleunigungsverlauf beim Beispielnocken aus [1].

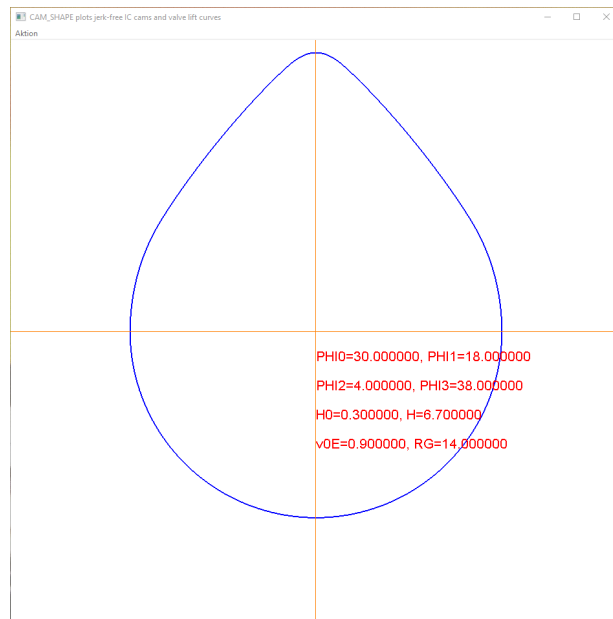


Abbildung 13: Form des Beispielnockens aus [1].



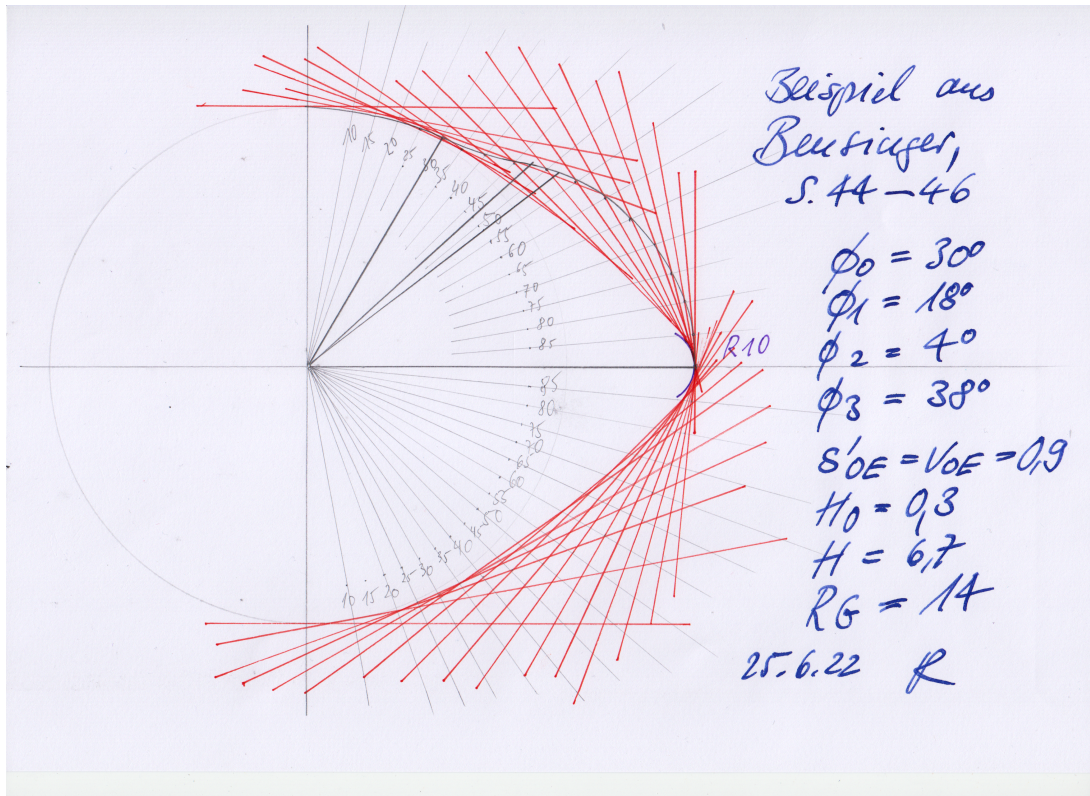


Abbildung 14: Form des Beispielnockens aus [1], von Hand gezeichnet.

Diese Datei könnten Sie ganz leicht in z.B. EXCEL einlesen und dort ggf. die Kurven anzeigen lassen. Die Ausgabedatei *f2.txt* enthält direkt die Fräsdaten in  $2^\circ$ -Schritten für tangenciales Fräsen auf einer Universal-Fräsmaschine, s. Abb. 8 und Abb. 9. Dabei ist die Nockenspitze mit  $0^\circ$  definiert, und Sie beginnen das Fräsen bei  $180^\circ$ , also genau gegenüber der Nockenspitze. Bis  $270^\circ$  bewegen Sie sich auf dem Nockengrundkreis mit dem Radius  $R_G$ , also ohne Höhenzustellung. Erst ab  $272^\circ$  fahren Sie den Fräskopf nach oben. Anschließend härten und anlassen Sie den gefrästen Nocken und glätten ihn mit Schmirgelleinen - das tut's vollkommen. Sie könnten aber auch den Nocken auf einer Eigenbau-Nockenschleifmaschine noch überschleifen. Dazu finden Sie in YouTube in unserem Kanal LSCAD die Videos 209, 211 und 220.

Mit dem Programm *CAM\_SHAPE* können Sie, nachdem *CAM\_KUBE* gelaufen ist, die eigentliche Nockenform plotten, und zwar für **flache Nockenfolger** wie z.B. Tassenstößel. Für Rollenstößel ergeben sich bei gleichen Ventilerhebungskurven vollkommen andere Nockenformen! Rollenstößel sind bis jetzt nicht in *CAM\_SHAPE* und *CAM\_KUBE* vorgesehen.

Die Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe des Beispielnocken aus [1], bezogen auf Nockenkoordinaten, von *CAM\_SHAPE* ausgegeben, sehen Sie in Abb. 10, Abb. 11 und Abb. 12; die eigentliche Nockenform in Abb. 13. Sie können auch ganz ohne *CAM\_SHAPE* die Nockenform von Hand zeichnen, indem Sie vom Grundkreis ausgehend die Wege auftragen und jeweils senkrecht dazu eine Gerade, d.h. Tangenten ziehen. Die Schar dieser Tangenten bilden die Einhüllende des Nockens, s. Abb. 14.

## Literatur

- [1] Bensinger, W.-D.: Die Steuerung des Gaswechsels in schnellaufenden Verbrennungsmotoren. 2.Auflage. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg: 1968
- [2] Urlaub, A.: Verbrennungsmotoren. 2.Auflage. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg: 1994
- [3] Apfelbeck, L.: Wege zum Hochleistungs-Viertaktmotor. 13.Auflage. Motorbuch-Verlag. Stuttgart: 1997.