

Berechnungen zur Ausbreitung von Infraschallwellen von Meteoren



Autor und Referent: Beat Booz, Frick 12.10.2019

Inhalts-Übersicht

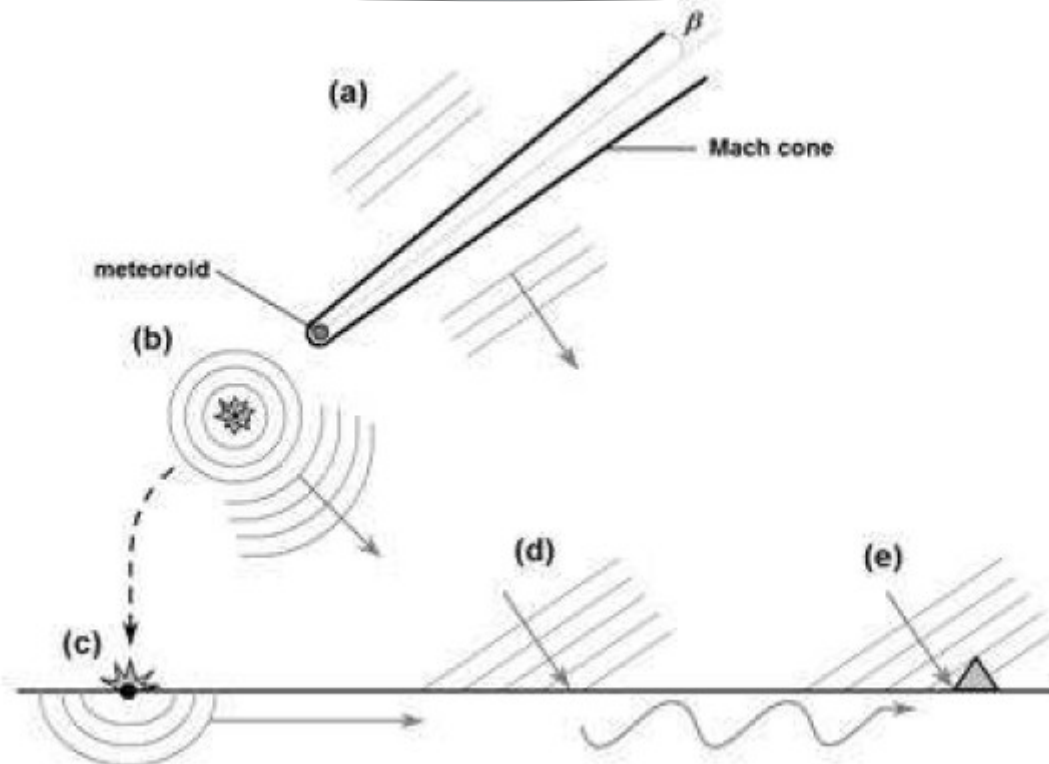
- Kurzübersicht zum Meteor-Infraschall
- Einflussgrößen für die Schall-Ausbreitung
- Methodik des Berechnungsverfahrens
- Besprechung eines Ergebnis-Plots

Meteor-Infraschall

Jeder schock-generierende Mechanismus in der Atmosphäre kann Infraschall-Wellen erzeugen, welche als Änderung von Dichte, Temperatur, Partikelgeschwindigkeit oder Druck detektiert werden können.

Meteoroide treten mit sehr hohen Geschwindigkeiten in die Atmosphäre ein und die Schock-Wellen erzeugen Infraschall. Diese Infraschall-Wellen können am Boden registriert werden.

Infraschall-Ausbreitung



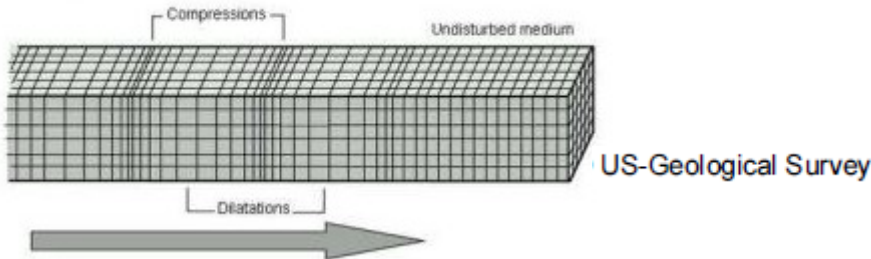
Edwards et al (2008)

- a) Während des Atmosphären-Eintrittes mit Überschallgeschwindigkeit erzeugte Schockwellen. Ausbreitungsrichtung praktisch senkrecht zur Trajektorie, da der Mach-Kegel nur einen minimalen Öffnungswinkel aufweist -> **zylinderförmige Ausbreitung entlang der Trajektorie**.
- b) **Fragmentationen** erzeugen Schockwellen, welche sich vom Fragmentationspunkt in alle Richtungen (**kugelförmig**) ausbreiten.
- c) Erzeugung von seismischen Wellen bei Meteoriten-Einschlägen.
- d) Seismische Vorläuferwellen, erzeugt durch Auftreffen des Schalles auf die Oberfläche (P, S oder Rayleigh). Da sich diese durch den Boden viel schneller ausbreiten, können sie einen Ort früher als der direkte Infraschall selbst erreichen.
- e) Kopplung der atmosphärischen Druckwelle mit der Oberflächenwelle am Ort der Mess-Station.

Ausbreitung seismischer Wellen

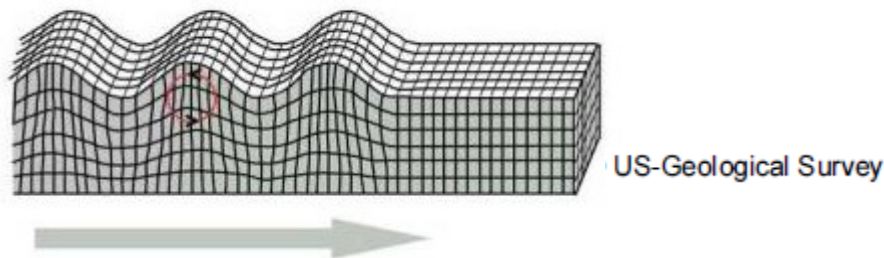
Erdbeben-Wellen:

P Wave



P-Wellen verhalten sich in den Gesteinen wie Schallwellen in der Luft. Sie sind aber mit einer Fortpflanzungsgeschwindigkeit von etwa 5 km pro Sekunde wesentlich schneller als Schallwellen. P-Wellen breiten sich in fester Materie als periodische Verdichtung und Streckung der Materie aus und sind genauso wie Schallwellen so genannte **Longitudinalwellen**. Die Teilchen des Gesteins schwingen in Fortpflanzungsrichtung der Welle hin und her.

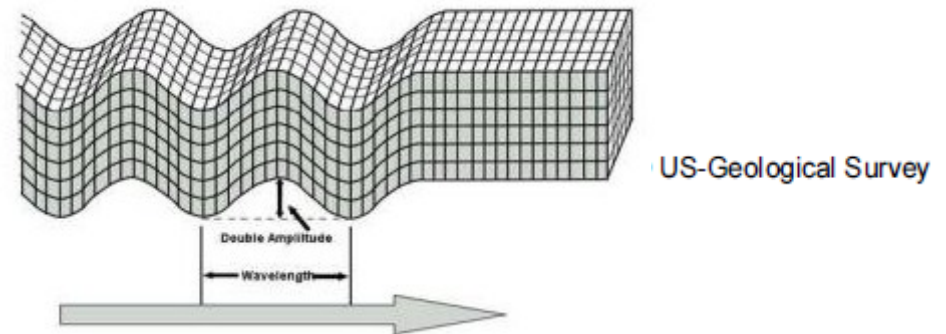
Rayleigh Wave



Einige P- und S-Wellen gelangen an die Oberfläche und werden dort reflektiert. Es bilden sich **Rayleigh-Wellen**. Sie sind **Oberflächenwellen** und breiten sich entlang der Erdoberfläche aus. Für ihre Schwingungen benötigen sie eine freie Oberfläche, wie die Wellen auf dem Meer. Ihre Fortpflanzung erfolgt in Ellipsen auf einer vertikalen Ebene. Sie verursachen die meisten Schäden und sind nach dem Physiker John William Rayleigh (1842-1919) benannt.

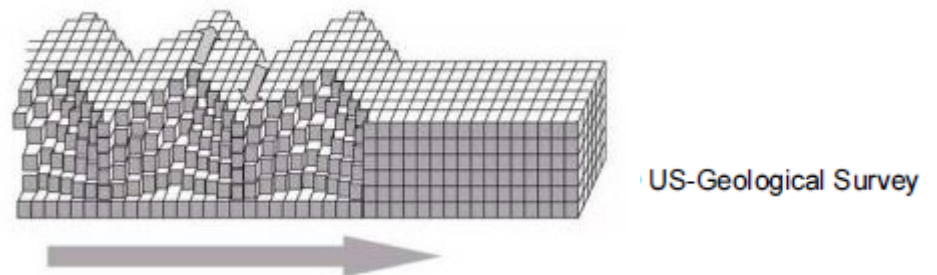
Ausbreitung Infraschall, Beat Booz, 12.10.2019

S Wave



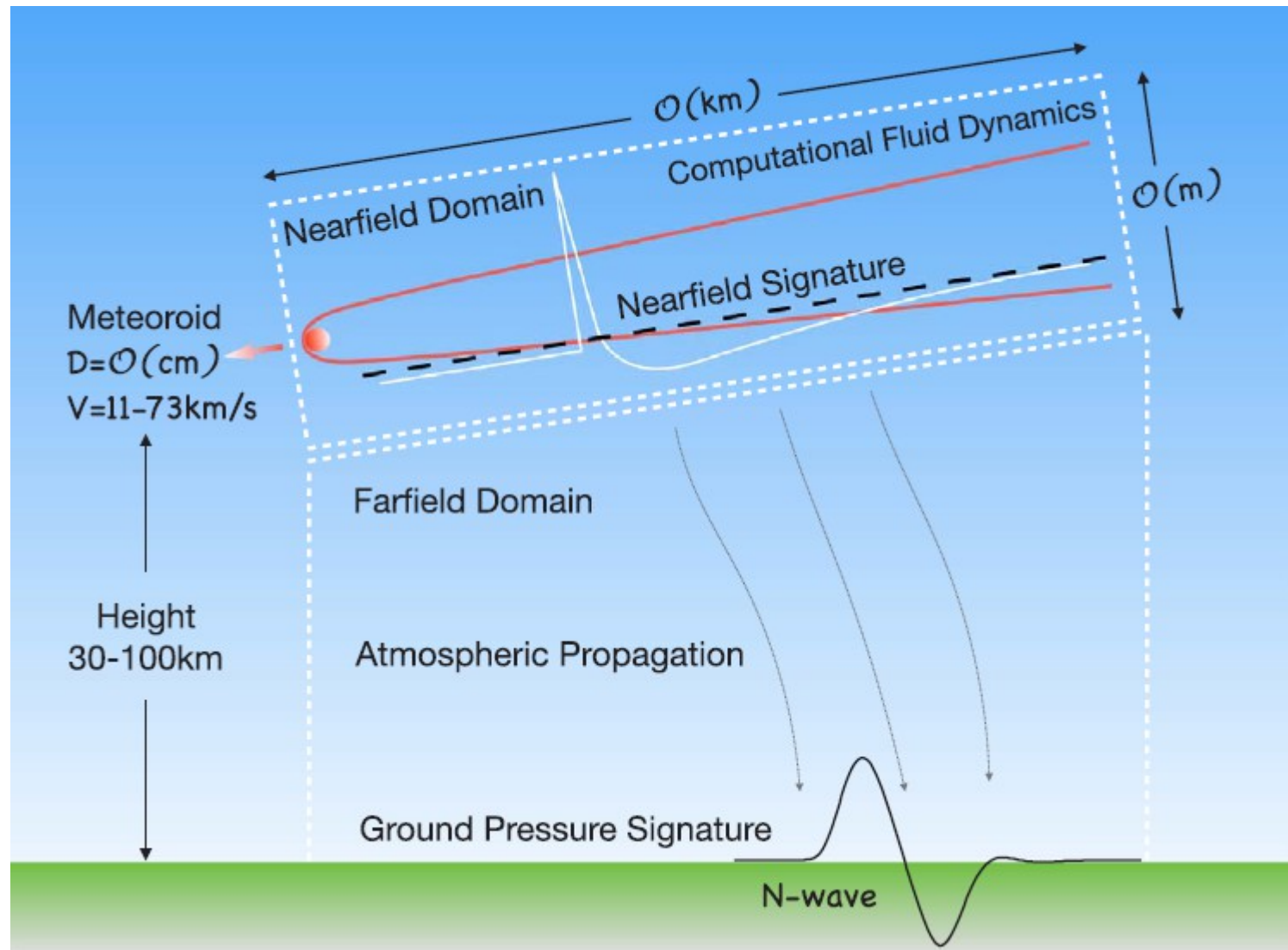
Mit etwas weniger als die halbe Geschwindigkeit von P-Wellen breiten sich **S-Wellen** aus. Weil bei ihnen die Gesteine in einer senkrechten Ebene zur Fortpflanzungsrichtung schwingen und eine biegende oder scherende Bewegung durchlaufen, nennt man sie **Transversal- oder Scherwellen**. Sie ähneln den transversalen Bewegungen von Lichtwellen. Weder in Flüssigkeiten noch in Gasen können sie sich fortpflanzen, da in diesen keine Scherbewegung möglich ist.

Love Wave



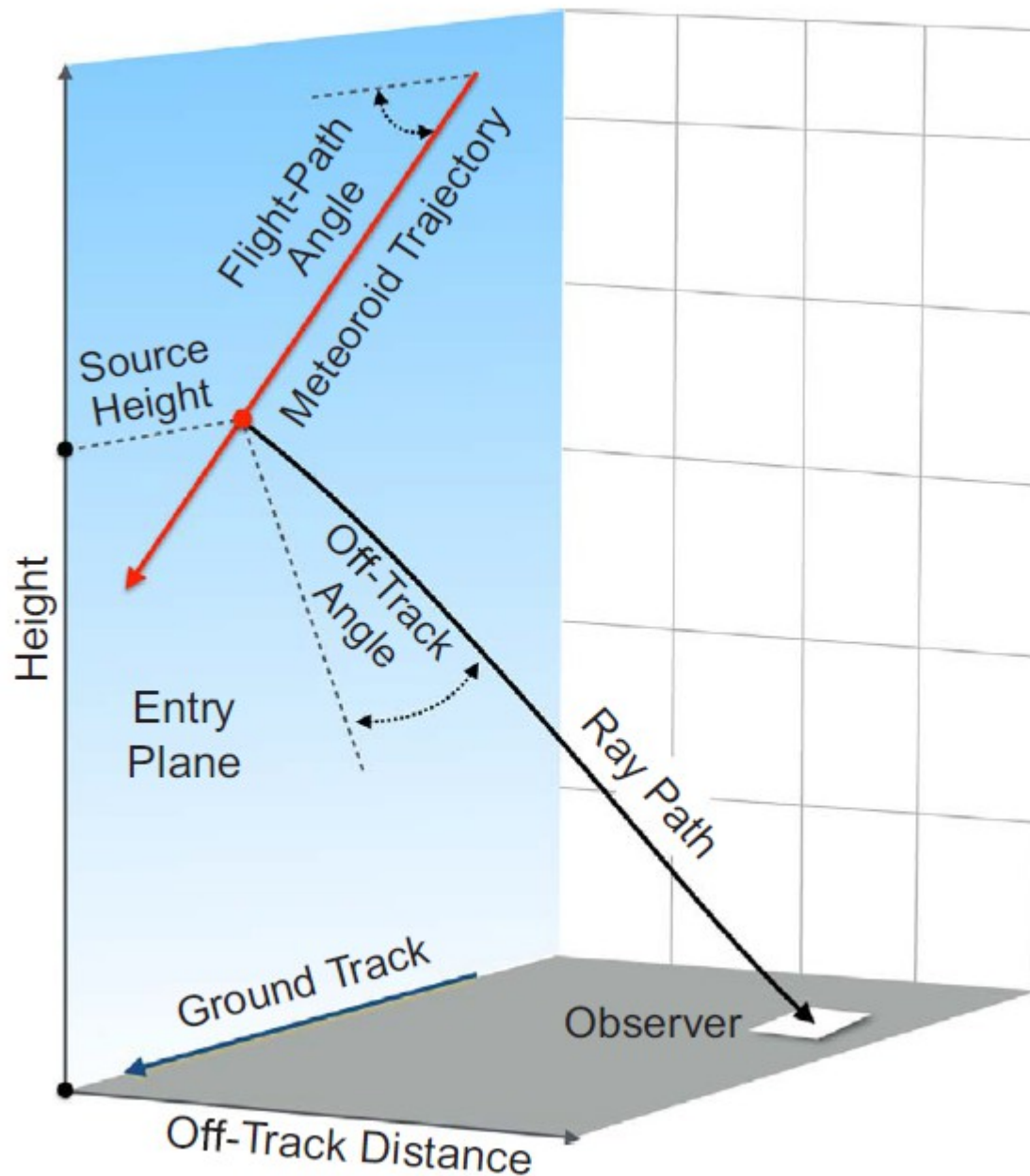
Die Teilchenbewegung der seismischen Oberflächenwellen, die nach dem englischen Physiker Augustus E. H. Love benannt sind, erfolgt auf einer horizontalen Fläche im rechten Winkel zur Fortbewegungsrichtung. Es findet keine vertikale Versetzung statt. Da sie oft über große Amplituden verfügen, ihre größten Ausschläge also sehr groß sind, richten sie durch horizontale Scherungen des Untergrundes starke Schäden an Gebäuden an.

Infraschall-Ausbreitung



Sketch of meteoroid entry generating a strong, cylindrical, blast-like pressure pulse that attenuates as it propagates to ground.

Infraschall-Ausbreitung

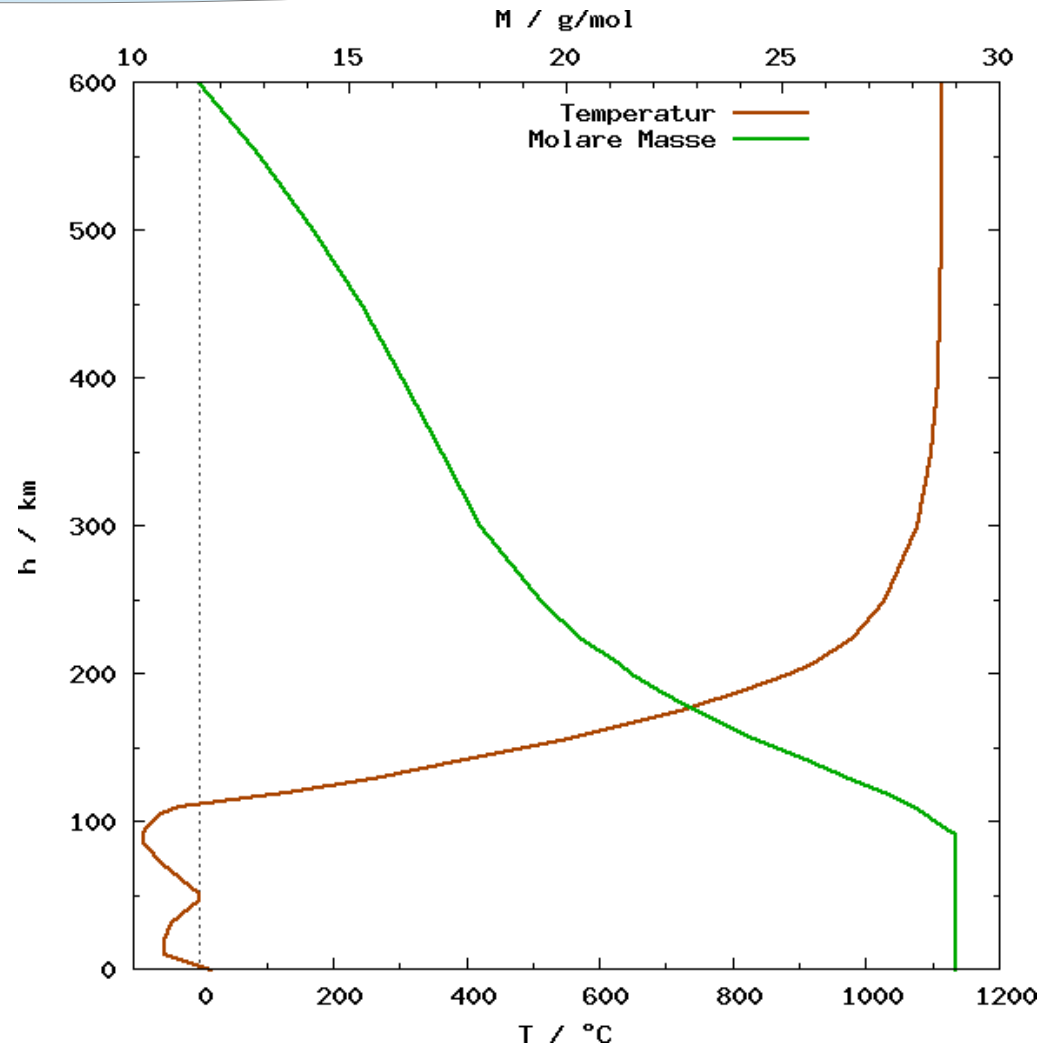
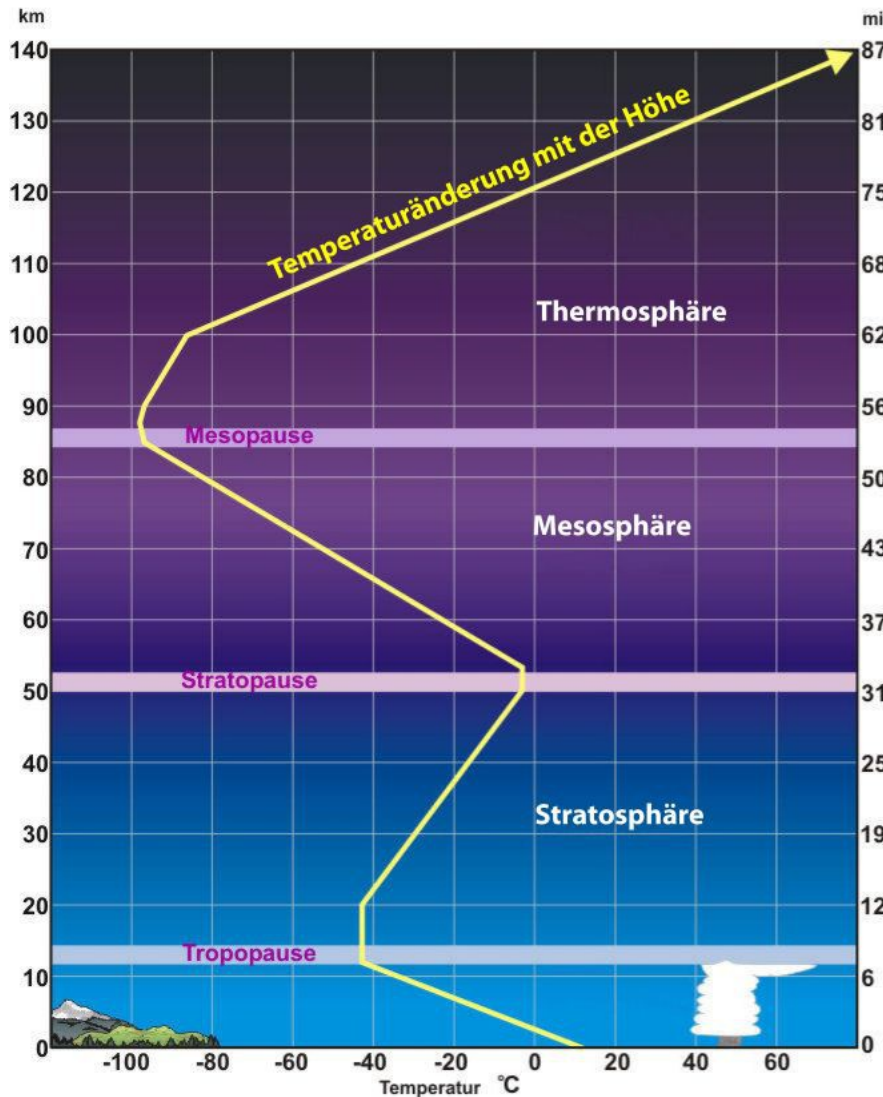


Ray path from a source point on the trajectory to the observer.

M. Nemec et al. (2017)

Atmosphäre - Temperatur

Temperaturprofil Atmosphäre:

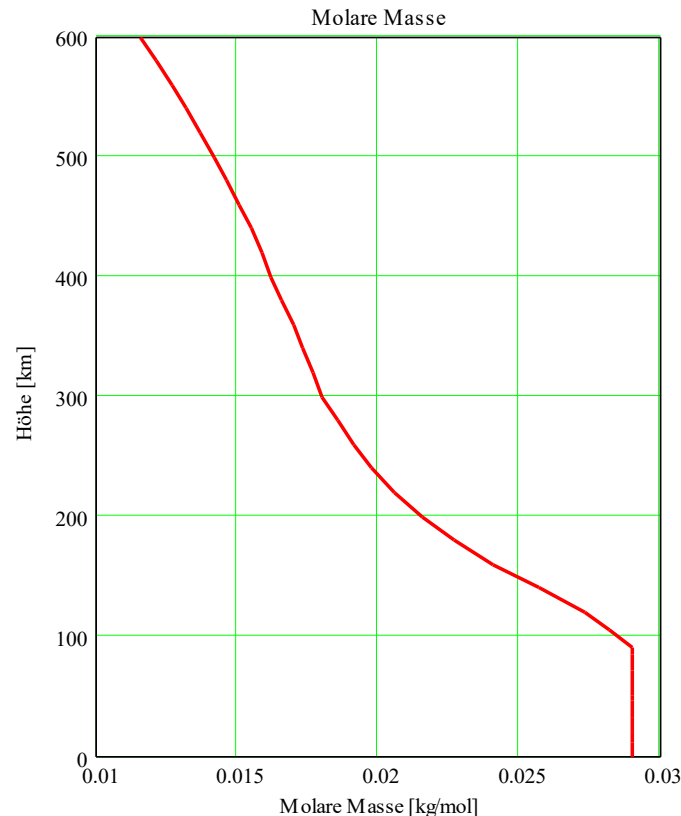
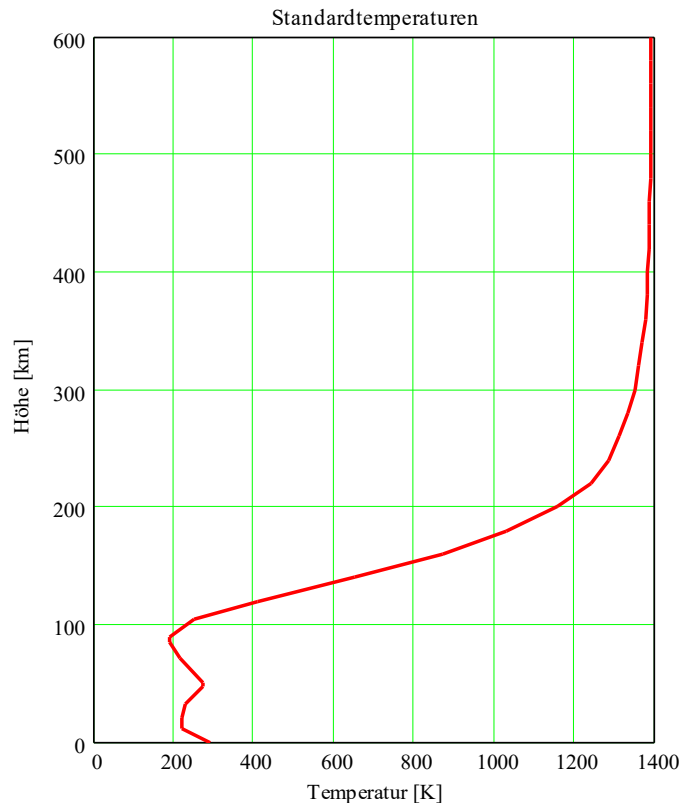


Durchschnittliche **Temperatur** und **molare Masse** der Luft in Abhängigkeit von der Höhe. Die Abnahme der molaren Masse mit zunehmender Höhe spiegelt die sich ändernde Zusammensetzung der Luft wieder.
(Quelle Wikipedia)

Schallgeschwindigkeit

Berechnung:

Die Schallgeschwindigkeit ist von der Temperatur und der molaren Masse der Luft abhängig. Bis ca. 95 km Höhe bleibt die molare Masse praktisch konstant. Für diesen Höhen-Bereich lässt sich daher die Formel vereinfachen.



Formel für Schallgeschwindigkeit:

$$c_S(H_{\text{Met}}) := \sqrt{1.402 \cdot 8.3145 \cdot \frac{T_{\text{mp}}(H_{\text{Met}})}{\text{MolMasse}(H_{\text{Met}})}} \cdot 10^{-3}$$

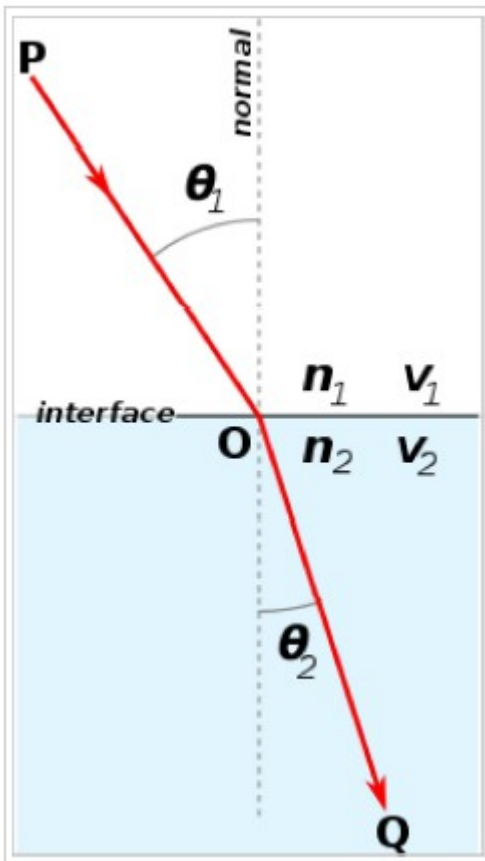
Für trockene Luft misst man $\kappa = 1,402$ und erhält mit einer mittleren Molmasse $M = 0,02896 \text{ kg/mol}$ für Stickstoff und Sauerstoff bei Normaltemperatur $T = 293,15 \text{ K}$ (20°C)

$$c_{\text{Luft}} \approx \sqrt{1,402 \cdot \frac{8,3145 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \cdot 293,15 \text{ K}}{0,02896 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}}} = 343,5 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

Für Schallgeschwindigkeit bis 95 km Höhe

Refraktion

Das Gesetz von Snell:



Quelle Wikipedia

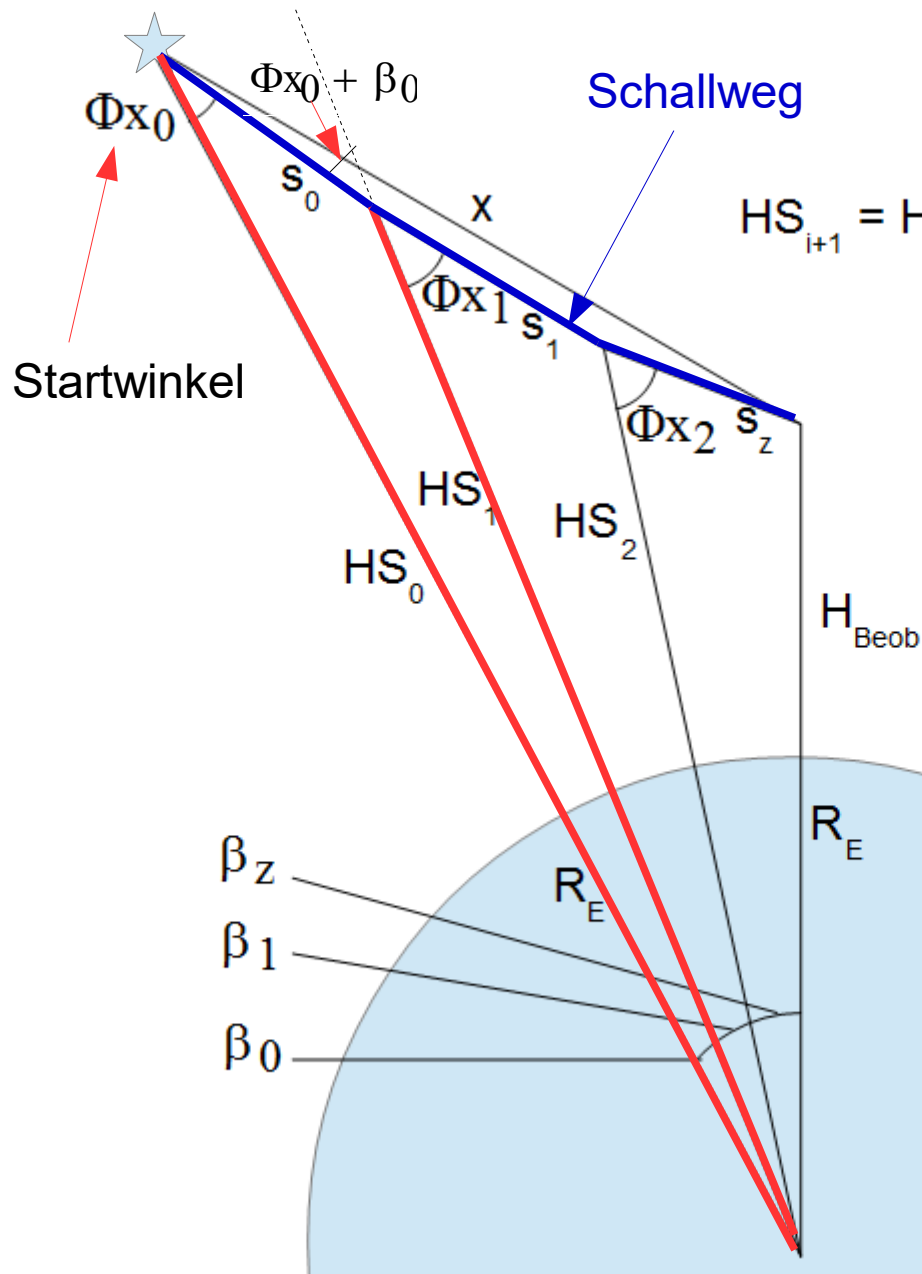
Infraschall-Refraktion:

Wie für das Licht, so gilt auch für die Schallwellen das identische Brechungsgesetz, welches den Zusammenhang zwischen den Winkeln an der Grenzfläche (Ausbreitungsrichtungen) von zwei unterschiedlichen, isotropischen Medien, wie Wasser, Glas oder Luft, beschreibt.

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Es gibt also eine Gesetzmässigkeit zwischen den Geschwindigkeiten (Schallgeschwindigkeiten) im Medium und den Brechungswinkeln (Richtungen)! Diese wird für die Berechnung der Schall-Ausbreitungsrichtungen angewendet.

Infraschall-Wegverlauf



Schrittweite der Berechnung

Berechnungsverfahren:

Nach Kosinussatz für 1. Dreieck!

$$(H_{S_0} + R_E - \Delta H)^2 = (H_{S_0} + R_E)^2 + (s_0)^2 - 2 \cdot (H_{S_0} + R_E) \cdot s_0 \cdot \cos(\Phi_{x0})$$

daraus s_0 berechnen!

$$\frac{s_0}{\sin(\beta_0)} = \frac{H_{S_0} + R_E - \Delta H}{\sin(\Phi_{x0})}$$

Nach dem Sinussatz gilt:

daraus β_0 berechnen!

Zusätzliche Bedingung ist der Brechungswinkel $f(cS)$ (siehe Skizze!)

$$\frac{c_{S_0}}{c_{S_1}} = \frac{\sin(\Phi_{x0} + \beta_0)}{\sin(\Phi_{x1})} \quad \text{damit ist } \Phi_{x1} \text{ berechenbar!}$$

Nach Kosinussatz für 2. Dreieck!

$$(H_{S_0} + R_E - 2 \cdot \Delta H)^2 = (H_{S_0} + R_E - \Delta H)^2 + (s_1)^2 - 2 \cdot (H_{S_0} + R_E - \Delta H) \cdot s_1 \cdot \cos(\Phi_{x1})$$

daraus s_1 berechnen!

$$\frac{s_1}{\sin(\beta_1)} = \frac{H_{S_0} + R_E - 2 \cdot \Delta H}{\sin(\Phi_{x1})}$$

Nach dem Sinussatz gilt:

daraus β_1 berechnen!

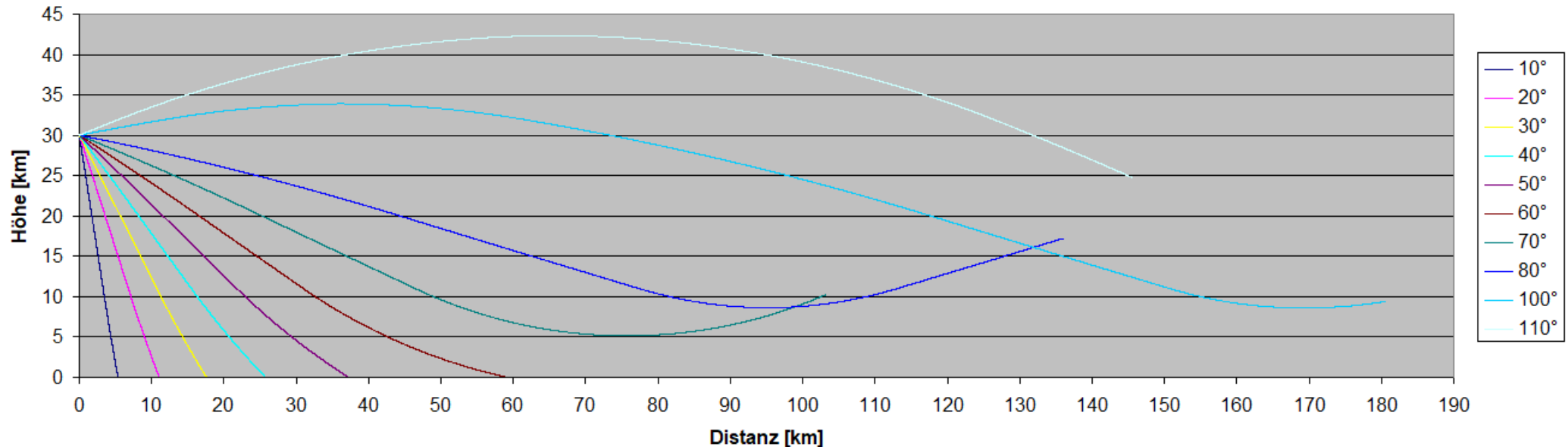
Zusätzliche Bedingung ist der Brechungswinkel $f(cS)$ (siehe Skizze!)

$$\frac{c_{S_1}}{c_{S_2}} = \frac{\sin(\Phi_{x1} + \beta_1)}{\sin(\Phi_{x2})} \quad \text{damit ist } \Phi_{x2} \text{ berechenbar!}$$

...usw bis alle Schichten bis zum Boden durchgerechnet sind.

Infraschall-Wegverlauf

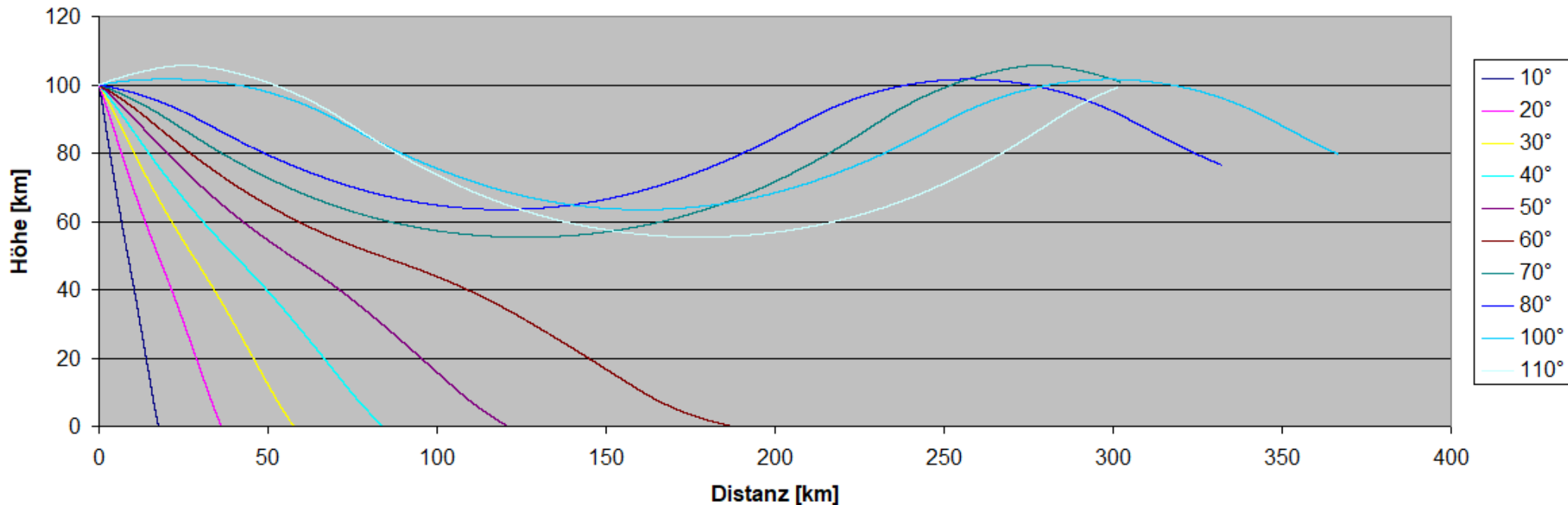
Meteor auf Höhe 30 km



Der Meteor befindet sich auf 30 km Höhe. Für den Infraschall sind die Ausbreitungslinien für Startwinkel von 10° bis 110° , bezüglich der Vertikalen nach unten, eingezeichnet. Es ist gut ersichtlich, dass der Infraschall lediglich bis zu einem Winkel von etwas mehr als 60° , in einer Entfernung von etwas mehr als 60 km, direkt den Boden erreichen kann.

Infraschall-Wegverlauf

Meteor auf Höhe 100 km

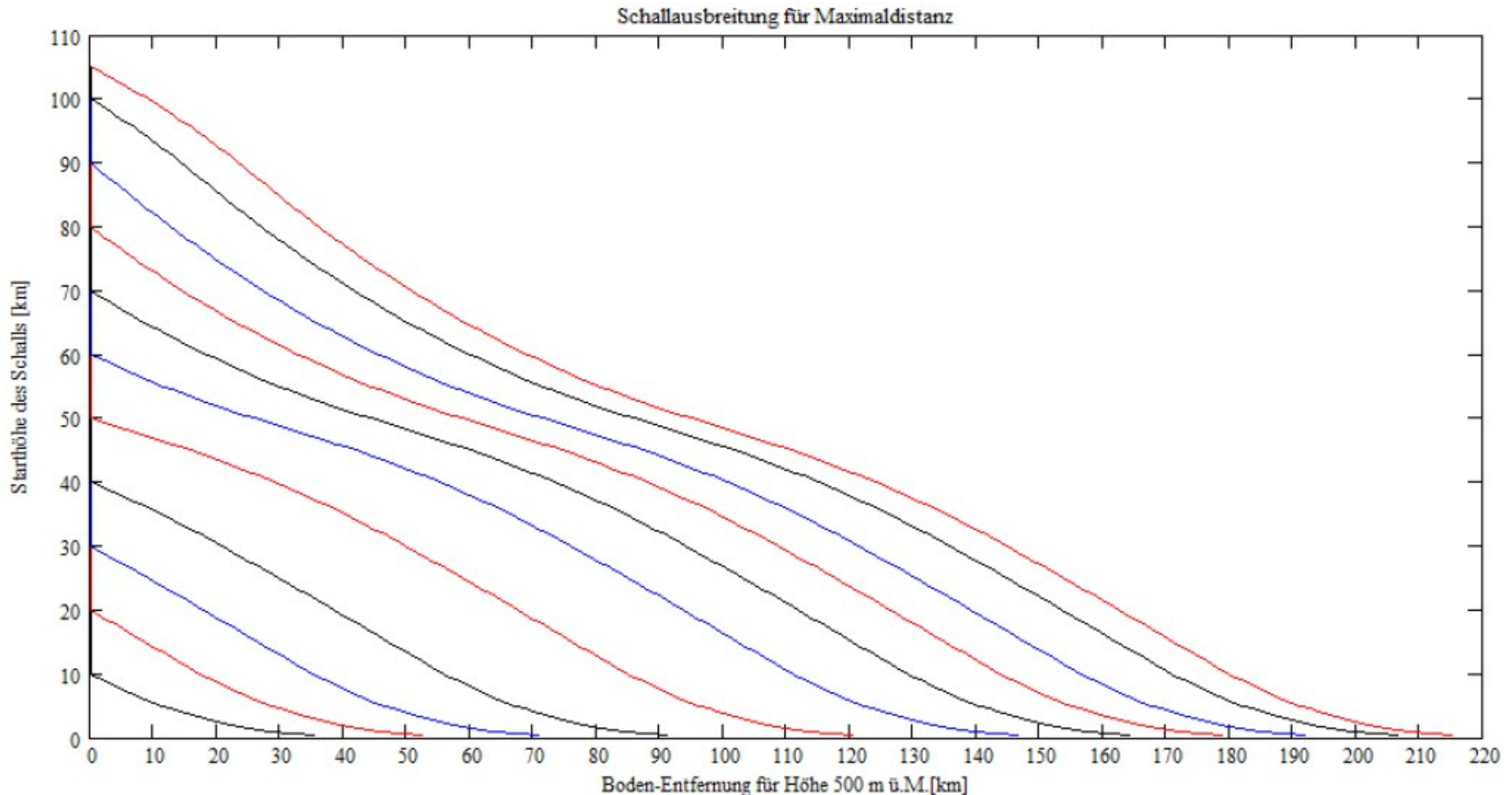


Der Meteor befindet sich auf 100 km Höhe. Für den Infraschall sind die Ausbreitungslinien für Startwinkel von 10° bis 110° , bezüglich der Vertikalen nach unten, eingezeichnet.

Es ist gut ersichtlich, dass der Infraschall lediglich bis zu einem Winkel von etwas mehr als 60° , in einer Entfernung von etwas mehr als 200 km, direkt den Boden erreichen kann.

Infraschall-Weg und Grenzentfernung

Die Höhe des Meteors hat also einen Einfluss auf die maximale Entfernung, welche die Infraschall-Wellen auf direktem Wege erreichen kann. Im folgenden Diagramm sind die Verläufe zu diesen **Grenz-Entfernungen** dargestellt, wie sie in der Berechnung verwendet werden.



Beschreibung Berechnung

Infraschall-Zusatzberechnung:

Der IS-Plot (Infraschall-Plot) soll eine gute Hilfe sein für die Beurteilung ob Infraschall an einer Station zu erwarten ist, und falls ja, das Zeitfenster der Schallankunft zu sehen. Hierzu wird die räumliche Trajektorienlage bezüglich den Infraschall-Stationen ausgewertet.

Für die Anfangs- und Endpunkte, sowie einen frei dazwischen definierbaren Punkt (z.B. Fragmentation) auf der Trajektorie, wird geprüft, ob sich kugelförmig ausbreitender Infraschall auf direktem Weg bis zu den Stationen gelangen kann. Das Kriterium dafür ist, dass die Distanz vom jeweiligen Meteorpunkt bis zur Empfangs-Station nicht grösser ist als die zuvor berechnete max. mögliche Grenzentfernung, welche der Schall in Abhängigkeit der jeweiligen Meteorhöhe zurücklegen kann, um den Boden noch zu erreichen.

Zusätzlich wird auch geprüft, ob es einen Punkt auf der Trajektorie gibt, welcher rechtwinklig zur jeweiligen Infraschall-Station liegt. Dies ist zwingend erforderlich für die Möglichkeit des Empfangs von sich zylinderförmig ausbreitendem Infraschall.

Alle Betrachtungen gelten für eine Standard-Atmosphäre, ohne Windeinfluss.

Mittels einer Korrektur für einen angenommenen konstanten Wind +/- (über den ganzen Höhenbereich wirkend) wird eine untere bzw obere Grenze des möglichen Zeitfensters errechnet.

Es erfolgt keinerlei Berücksichtigung der Schallstärken-Abnahme (Streuung durch Turbulenzen).

Mögliche Schall-Reflexionen am Boden werden ebenfalls nicht berücksichtigt.-> nur der direkte Schall-Weg.

Berechnungs-Ergebnisse S.1.1

Fachgruppe Meteorastronomie

Berechnung: Beat Booz

Auswertungen zur geometrischen Lage der mittleren Gesamt-Trajektorie in Bezug auf die Möglichkeit von Infraschall-Registrierungen

Feuerkugel: Kalenderdatum: Tag: D = 11 H_UT = 20 [UTC]
 Monat: M = 7 M_UT = 21
 Jahr: Y = 2019 S_UT = 43

Für die Zeit-Berechnungen der Schall-Ankunft bei den Stationen wird obige Zeit als **Startzeit des Schalles** gesetzt. Die Zeit für das Durchlaufen der Trajektorie findet somit in dieser approximativen Auswertung keine Berücksichtigung! -> Der Schall startet in diesem Modell gleichzeitig von allen Trajektorien-Punkten.

Infraschall-Stationen: Geografische Koordinaten:

ϕ nördlich positiv, λ östlich von Greenwich
 südlich negativ, positiv, westlich von
 Greenwich negativ

Höhe
 Geogr. Geogr. über
 Breite ϕ Länge λ Meer
 [° dez.] [° dez.] [km]

Nr. Stat.-Id. Stationsname

IFS_KOORD1 = $\begin{pmatrix} 1 & \text{"ENT"} & \text{"Beobachtungsstation Entfelden"} \\ 2 & \text{"VTE"} & \text{"Observatoire géophysique, Val Terbi"} \\ 3 & \text{"BOS"} & \text{"Privatsternwarte Bos-cha"} \\ 4 & \text{"LOC"} & \text{"Beobachtungsstation Locarno"} \end{pmatrix}$

IFS_KOORD2 = $\begin{pmatrix} 47.3626 & 8.0375 & 0.425 \\ 47.359345 & 7.498493 & 0.572 \\ 46.777367 & 10.169708 & 1.666 \\ 46.1723 & 8.7878 & 0.367 \end{pmatrix}$

Berechnungs-Ergebnisse S.1.2

Mittlere Trajektorie:

Gesamt-Länge [km]:

$$\text{TrajL} = 131.473$$

Anfangspunkt:

Endpunkt:

Geografische Breite [°]:

$$\Phi B_S = 45.87543919$$

$$\Phi B_E = 46.8948879$$

Geografische Länge [°]:

$$\lambda B_S = 9.13074662$$

$$\lambda B_E = 8.50808425$$

Höhe [km]:

$$HB_S_km = 99.812$$

$$HB_E_km = 57.695$$

**Toleranz für
Schallgeschwindigkeit**
[km/s]:

$$\Delta c = 0$$

Hinweis:

Die mittlere Schallgeschwindigkeit beim Durchlaufen der Höhe des jeweiligen Punktes bis zum Boden (500 m ü.M.) wird berechnet. Deshalb kann normalerweise mit Toleranz $\Delta c = 0$ gerechnet werden.

Windstärke:

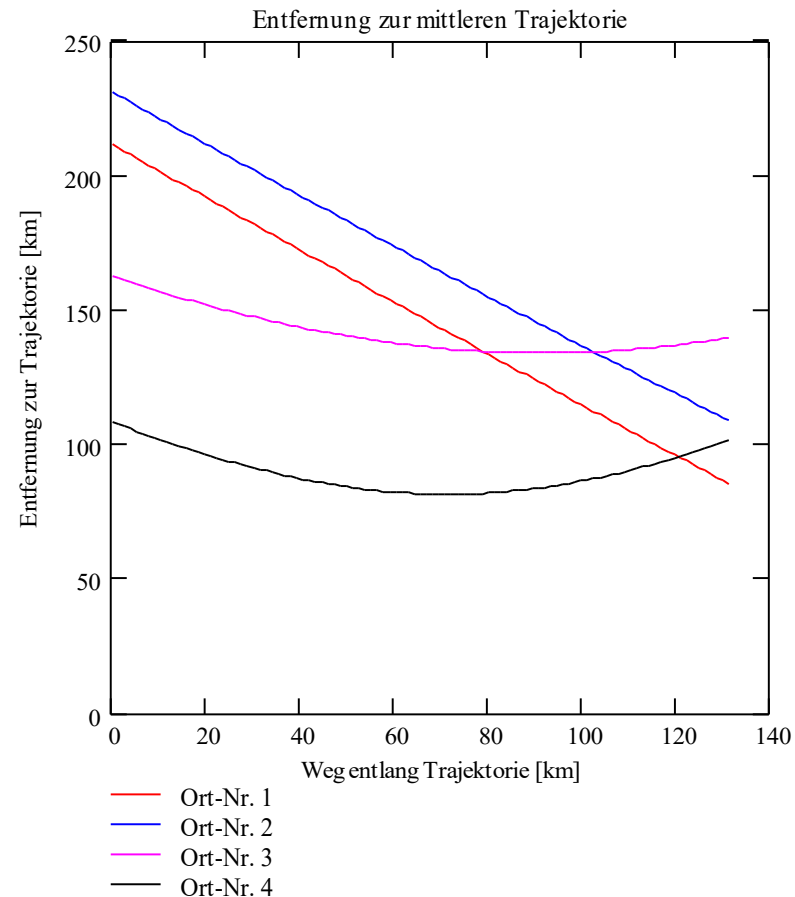
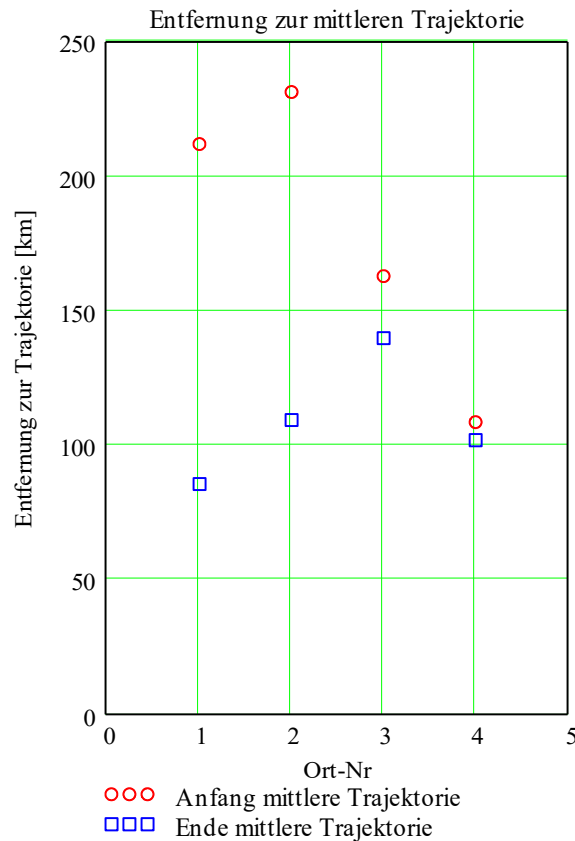
$$v_{\text{Wind_max}} = 60$$

[km/h]

$$\frac{v_{\text{Wind_max}}}{3600} = 0.017 \quad [\text{km/s}]$$

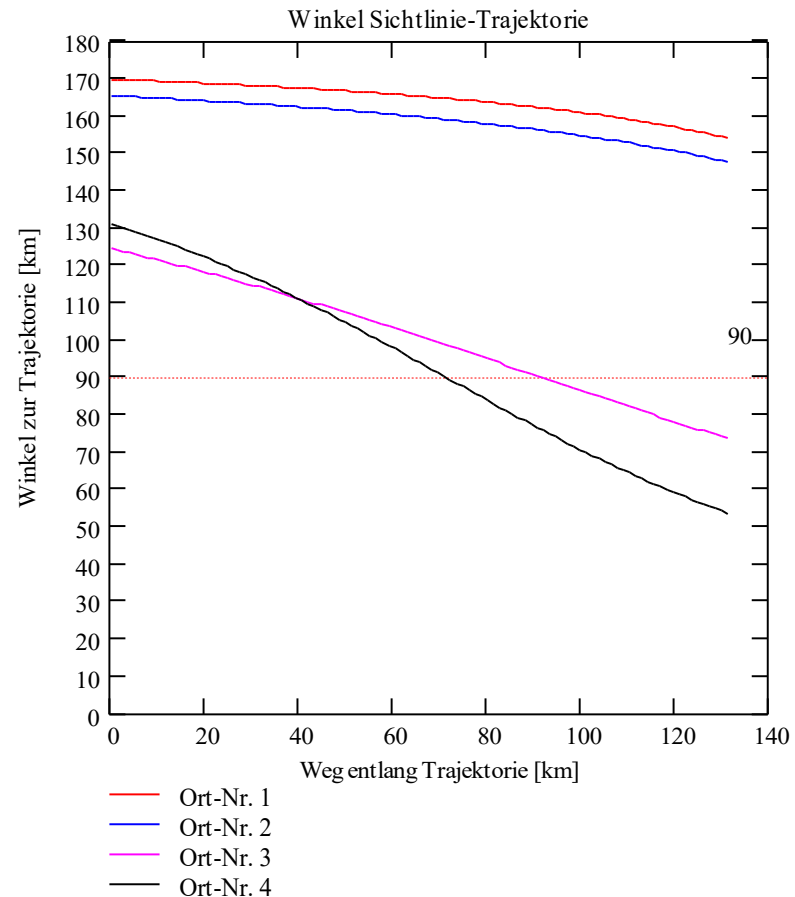
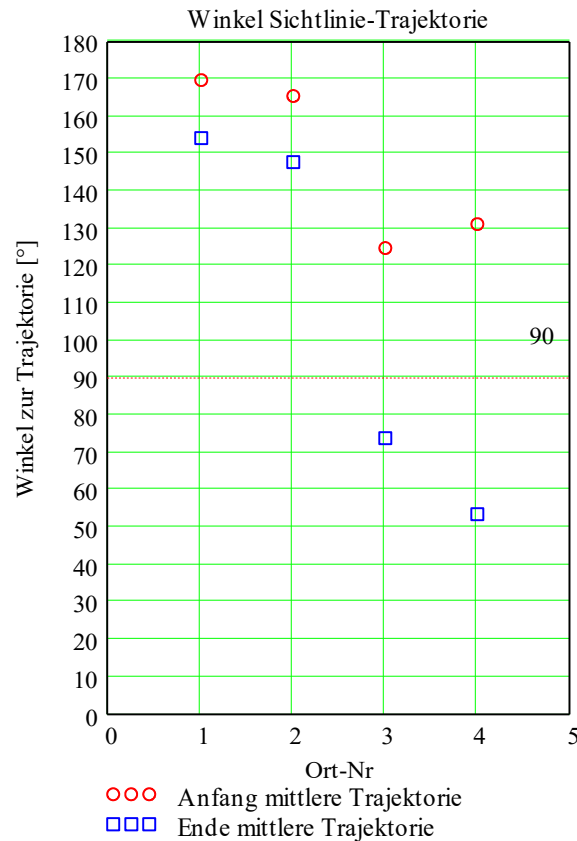
Berechnungs-Ergebnisse S.1.3

Entfernungen zur mittleren Trajektorie:



Berechnungs-Ergebnisse S.1.4

Winkel zwischen Sichtlinien und mittlerer Trajektorie:



Berechnungs-Ergebnisse S.2.1

Zeitfenster für möglichen Infraschall-Empfang:



Berechnung: Beat Booz

Die Zeiten sind als Richtwerte, welche auf Basis mittlerer Schallgeschwindigkeiten und der Direkt-Entfernung zwischen den Stationen und den Trajektorienpunkten berechnet wurden, zu verstehen. Für maximale Windeinflüsse und Toleranz in der Schallgeschwindigkeit sind die frühesten und spätesten Eintreffzeiten angegeben. Bei den Zeitberechnungen findet keine Prüfung bezüglich geometrischer Möglichkeit der Schallankunft (Grenzentfernung!) statt -> **Ob Infraschall zu erwarten ist, muss unter "Möglichkeit für das Empfangen von Infraschall" überprüft werden!**



Gesetzte Windstärke [km/h]: $v_{\text{Wind_max}} = 60$

Toleranz Schallgeschwindigkeit [km/s]: $\Delta c = 0$

Minimal- und Maximalzeit des Zeitfensters der Schallankunft (mit Wind und Toleranz!):

	J	M	T	h	m	s		J	M	T	h	m	s
ST =	"ENT"	Zeit_min =						Zeit_max =					
	"VTE"												
	"BOS"												
	"LOC"												
		2019	7	11	20	26	3.1	2019	7	11	20	34	1.1
		2019	7	11	20	27	14.8	2019	7	11	20	35	8.9
		2019	7	11	20	28	32	2019	7	11	20	31	9.3
		2019	7	11	20	25	53	2019	7	11	20	28	0.6

Extremwerte aus allen berechneten Trajektorienpunkten!

Berechnungs-Ergebnisse S.2.2

Möglichkeit für den Empfang des Infraschalles und das entsprechende Zeitfenster für den **Anfangspunkt** der mittleren Trajektorie:

Anfangspunkt der mittleren Trajektorie, für kugelförmige Schallausbreitung bei Fragmentationen und Explosionen:

Station:	Kugelf. Schall:	Winkel B-T [°]:	Distanz [km]:	Grenzentfernung für Schall-Empfang (von Höhe abhängig!) [km]:	Geografische Koordinaten der Punkte auf der Trajektorie:	Berechnete mittlere Schallgeschwindigkeit [km/s]:
					Breite [°]: Länge [°]: Höhe [km]:	
DS =	$\begin{pmatrix} \text{"ENT"} & \text{"ja"} & 169.787 & 211.555 \\ \text{"VTE"} & \text{"nein"} & 165.364 & 230.991 \\ \text{"BOS"} & \text{"ja"} & 124.384 & 162.313 \\ \text{"LOC"} & \text{"ja"} & 131.177 & 108.219 \end{pmatrix}$			Grenz_S = 230.596	GS = (45.875439 9.130747 99.812)	c _{mS} = 0.303

Bedingung muss „ja“ sein, damit der Schall eintreffen kann!

Zeiten (früher, ohne Wind, später) der **Schallankunft** vom **Anfangspunkt** (kugelförmige Ausbreitung!) [UTC]:

J	M	T	h	m	s	J	M	T	h	m	s	J	M	T	h	m	s
2019	7	11	20	32	44.2	2019	7	11	20	33	20.5	2019	7	11	20	34	1.1
2019	7	11	20	33	44.9	2019	7	11	20	34	24.6	2019	7	11	20	35	8.9
2019	7	11	20	30	10.3	2019	7	11	20	30	38.2	2019	7	11	20	31	9.3
2019	7	11	20	27	21.2	2019	7	11	20	27	39.8	2019	7	11	20	28	0.6

Berechnungs-Ergebnisse S.2.3

Möglichkeit für den Empfang des Infraschalles und das entsprechende Zeitfenster für den **Endpunkt** der mittleren Trajektorie:

Endpunkt der mittleren Trajektorie, für kugelförmige Schallausbreitung bei Fragmentationen und Explosionen:

Station:	Kugelf. Schall:	Winkel B-T [°]:	Distanz [km]:	Grenzentfernung für Schall-Empfang (von Höhe abhängig!) [km]:	Entfernung des Punktes vom Anfangspunkt der Trajektorie [km]:	Geografische Koordinaten der Punkte auf der Trajektorie: Breite [°]: Länge [°]:	Höhe [km]:	Berechnete mittlere Schallgeschwindigkeit [km/s]:
DE =	"ENT"	"ja"	153.947	85.408	Grenz_E = 153.324	TrajL = 131.473	GE = (46.894888 8.508084 57.695)	c _{mE} = 0.312
	"VTE"	"ja"	147.614	108.971				
	"BOS"	"ja"	73.448	139.744				
	"LOC"	"ja"	53.523	101.3				

Zeiten (früher, ohne Wind, später) der **Schallankunft** vom **Endpunkt** (kugelförmige Ausbreitung!) [UTC]:

Bedingung muss „ja“ sein, damit der Schall eintreffen kann!

	J	M	T	h	m	s
ZEf =	2019	7	11	20	26	3.1
	2019	7	11	20	27	14.8
	2019	7	11	20	28	48.5
	2019	7	11	20	26	51.5

	J	M	T	h	m	s
ZE =	2019	7	11	20	26	17
	2019	7	11	20	27	32.5
	2019	7	11	20	29	11.3
	2019	7	11	20	27	7.9

	J	M	T	h	m	s
ZEs =	2019	7	11	20	26	32.4
	2019	7	11	20	27	52.3
	2019	7	11	20	29	36.6
	2019	7	11	20	27	26.3

Berechnungs-Ergebnisse S.2.4

Möglichkeit für den Empfang des Infraschalles und das entsprechende Zeitfenster für einen **definierten Punkt** auf der mittleren Trajektorie:

Definierter Punkt auf Trajektorie, für kugelförmige Schallausbreitung bei Fragmentationen und Explosionen:

Station:	Kugelf. Schall:	Winkel B-T [°]:	Distanz [km]:	Grenzentfernung für Schall-Empfang (von Höhe abhängig!) [km]:	Entfernung des Punktes vom Anfangspunkt der Trajektorie [km]:	Geografische Koordinaten der Punkte auf der Trajektorie: Breite [°]: Länge [°]:	Berechnete mittlere Schallgeschwindigkeit [km/s]:
DP =	"ENT"	"ja"	158.698	103.257			
	"VTE"	"ja"	152.368	125.849			
	"BOS"	"ja"	81.367	135.488			
	"LOC"	"ja"	63.422	91.08			
				Grenz_man = 167.54	sT _{manuell} = 112	GP = (46.743285 8.6023 63.781)	c _{m_man} = 0.312

Bedingung muss „ja“ sein, damit der Schall eintreffen kann!

Zeiten (früher, ohne Wind, später) der **Schallankunft** vom **definierten Punkt** (kugelförmige Ausbreitung!) [UTC]:

J	M	T	h	m	s
2019	7	11	20	26	57.4
2019	7	11	20	28	6.1
2019	7	11	20	28	35.5
2019	7	11	20	26	20.3

Z_{mf} =

J	M	T	h	m	s
2019	7	11	20	27	14.2
2019	7	11	20	28	26.6
2019	7	11	20	28	57.5
2019	7	11	20	26	35.1

Z_m =

J	M	T	h	m	s
2019	7	11	20	27	32.9
2019	7	11	20	28	49.4
2019	7	11	20	29	22.1
2019	7	11	20	26	51.6

Z_{ms} =

Berechnungs-Ergebnisse S.2.5

Möglichkeit für den Empfang des Infraschalls und das entsprechende Zeitfenster für zylindrische Schallausbreitung entlang der mittleren Trajektorie (90° Winkel zwischen Station-Punkt zur mittleren Trajektorie muss vorhanden sein!):

Punkte auf Trajektorie mit zylindrischer Schallausbreitung (0 in Ergebnissen bedeutet, dass es keinen solchen Punkt gibt):

Der Winkel zwischen Beobachtungslinie und Trajektorie sollte 90° (=kleinste Entfernung!) erreichen, damit sich zylindrisch zur Trajektorie ausbreitender Schall (Mach'scher Kegel mit kleinem Öffnungswinkel!), bei der Infraschall-Station ankommen kann!

Station:	Kugelf. Schall:	Zylindr. Schall:	Distanz [km]:	Grenzentfernung für Schall-Empfang (von Höhe abhängig!) [km]:	Entfernung der Punkte vom Anfangspunkt der Trajektorie [km]:	Geografische Koordinaten der 90° Punkte auf der Trajektorie:			Berechnete mittlere Schallgeschwindigkeit [km/s]:
						Breite [°]:	Länge [°]:	Höhe [km]:	
DZ =	"ENT"	"nein"	"nein"	0	Grenz_zyl =	sT =	GZ =		c _{m_zyl} =
	"VTE"	"nein"	"nein"	0					
	"BOS"	"ja"	"ja"	133.953					
	"LOC"	"ja"	"ja"	81.455					

Beide Bedingungen müssen auf „ja“ stehen, damit der Schall eintreffen kann!

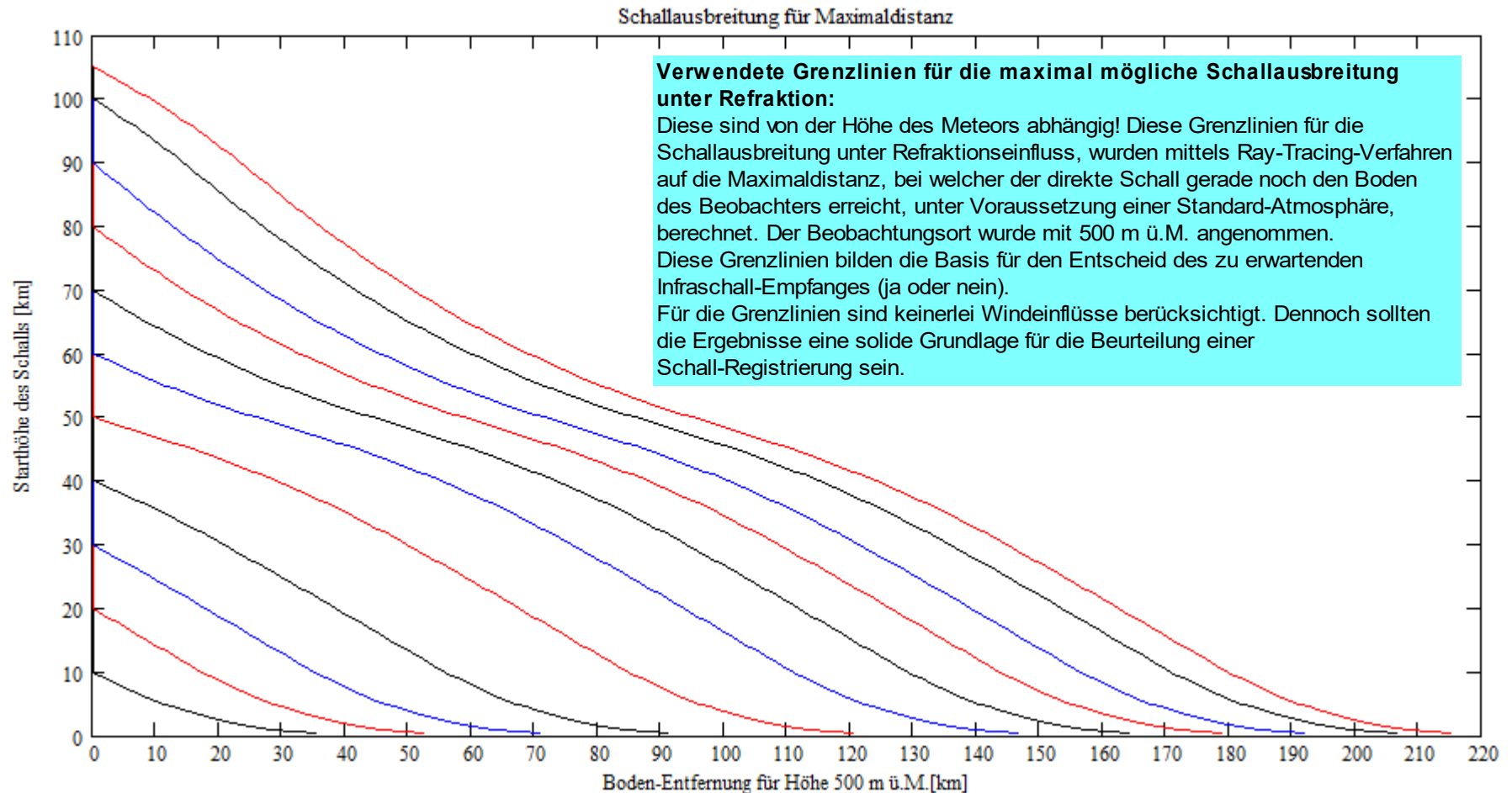
Zeiten (früher, ohne Wind, später) der **Schallankunft** der **Punkte mit 90° Winkel** zwischen Beobachtungslinie und Trajektorie -> zylinderförmige Ausbreitung! [UTC]: 0 bedeutet, dass es keinen solchen Punkt gibt.

	J	M	T	h	m	s
Zzf =	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	2019	7	11	20	28	32
	2019	7	11	20	25	53

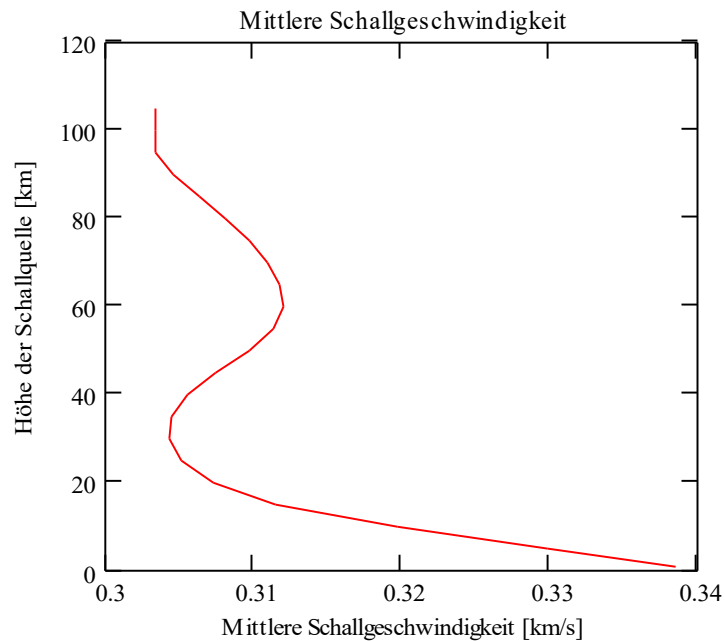
	J	M	T	h	m	s
Zz =	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	2019	7	11	20	28	53.9
	2019	7	11	20	26	6.4

	J	M	T	h	m	s
Zzs =	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	2019	7	11	20	29	18.3
	2019	7	11	20	26	21.4

Berechnungs-Ergebnisse S.3.1



Berechnungs-Ergebnisse S.3.2



Die in den Berechnungen verwendete **mittlere Schallgeschwindigkeit** ist der arithmetische Mittelwert, welcher sich aus der Summe der jeweiligen Schallgeschwindigkeiten in allen, ab der Höhe der Schallquelle, durchlaufenen Höhenschichten ergibt!! Dieser Wert steht damit in direktem Bezug zu Weg und Zeit.

Schluss-Fazit

Auch wenn man aufwändige Rechenmodelle für eine räumliche Infraschall-Ausbreitung entwickeln würde, scheint die erreichbare Genauigkeit begrenzt zu sein. Es ist keine exakte Infraschallauswertung ohne genaue 3D-Atmosphärendaten über einen grösseren Bereich der Infraschall-Stationen und der Trajektorie möglich!

-> Eine geometrisch genaue Ortung, z.B. eines Fragmentationspunktes ohne visuelle Beobachtungen, lediglich auf der Basis von Infraschall mittels Rückrechnungen von Schall-Laufzeiten scheint schwierig.

Jedoch wäre es weiterhin interessant, wenn man Feuerkugel-Ereignisse den Infraschall-Signalen zuordnen könnte. Aus der Signalauswertung selbst (Wellenform, Amplitude, Dauer), könnten vielleicht Rückschlüsse auf die Energiestärke der Detonation, Durchmesser des Meteoroiden und andere Größen gewonnen werden. Dies wäre ein neues Tätigkeitsfeld für uns.

Bemerkungen? Fragen? Diskussion?

Vielen Dank für die
Aufmerksamkeit!

