



WS 2016/2017
LV Rechnernetzpraxis

4. Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

Dr. rer.nat. D. Gütter

Mail: Dietbert.Guetter@tu-dresden.de

WWW: <http://www.guetter-web.de/education/rnp.htm>

Erzeugung elektromagnetischer Wellen

Frequenzbereich 10^4 ... 10^{12} Hz
Wellenlängenbereich 30 km ... 300 μm

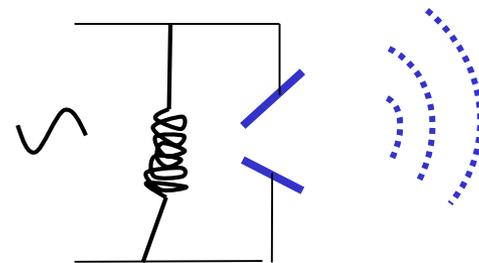
Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit

$$c_{\text{Vakuum}} = 299\,792\,458 \text{ km/s} \quad (\text{ca. } 300\,000 \text{ km/s})$$

Zusammenhang

$$c = \lambda * f \quad \lambda : \text{Wellenlänge, } f: \text{Frequenz}$$

Erzeugung durch offene Schwingkreise
(Antennen)



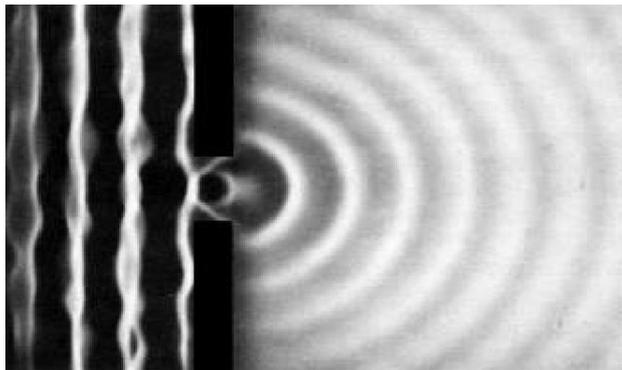
Huygenssches Prinzip

Zitat: <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/wellenmodell-des-lichts/ausblick>

Wellenausbreitung

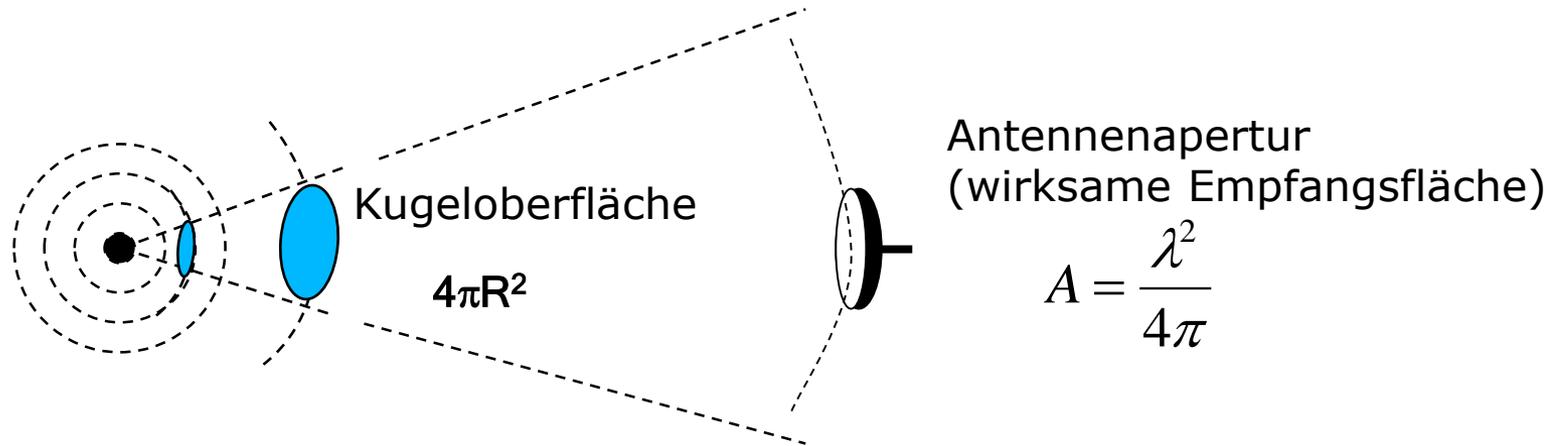
- Jeder Punkt einer Wellenfront kann als Ausgangspunkt von Elementarwellen (Kreis- bzw. Kugelwellen) angesehen werden, die sich mit gleicher Geschwindigkeit und Frequenz wie die ursprüngliche Welle ausbreiten.
- Die Einhüllende der Elementarwellen ergibt die neue Wellenfront.

Beispiel: Simulationen (s.o.)
Lichtbeugung am Spalt (s.u.)



Wellenausbreitung
ist sehr komplex

isotroper Kugelstrahler



Freiraumdämpfung für Leistungsdichte

$$F = \frac{P_T}{P_R} = 4\pi R^2 \times \frac{4\pi}{\lambda^2}$$

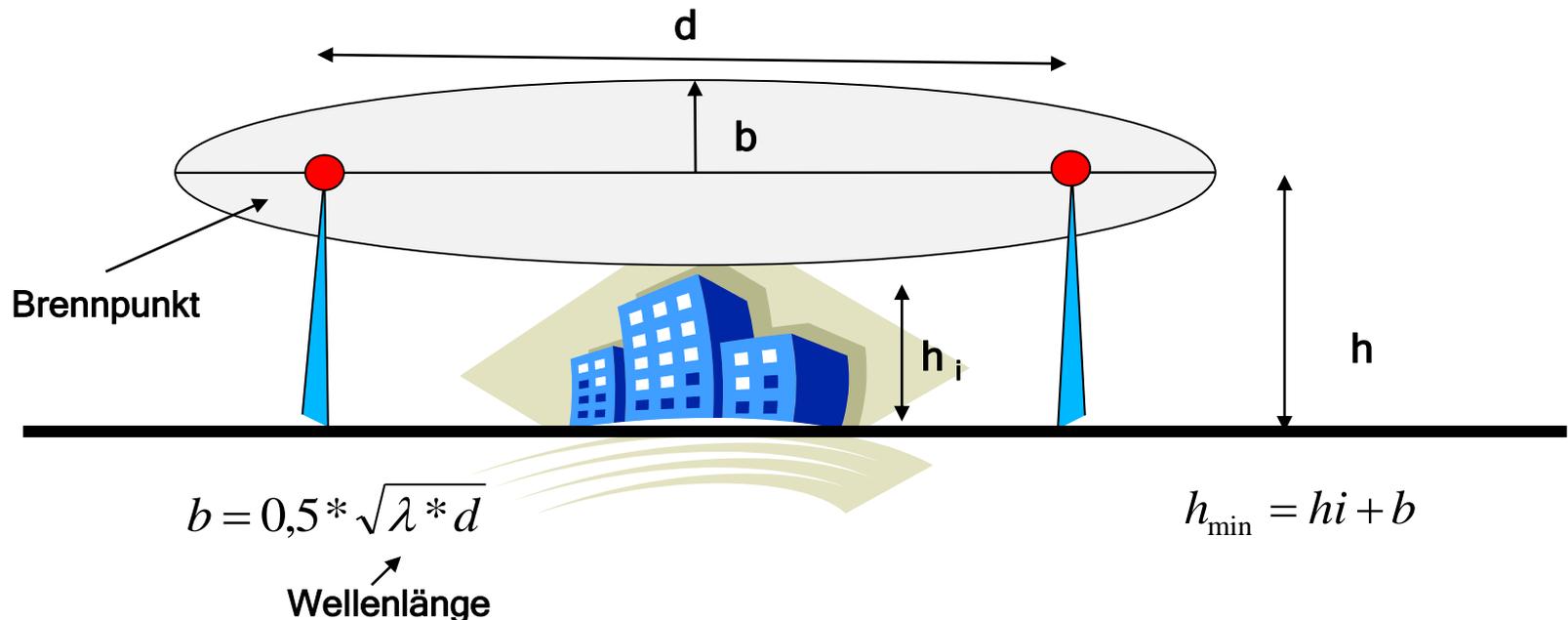
$$= \left(\frac{4 * \pi * R}{\lambda} \right)^2$$

Fresnelzone

Elementarwellen →

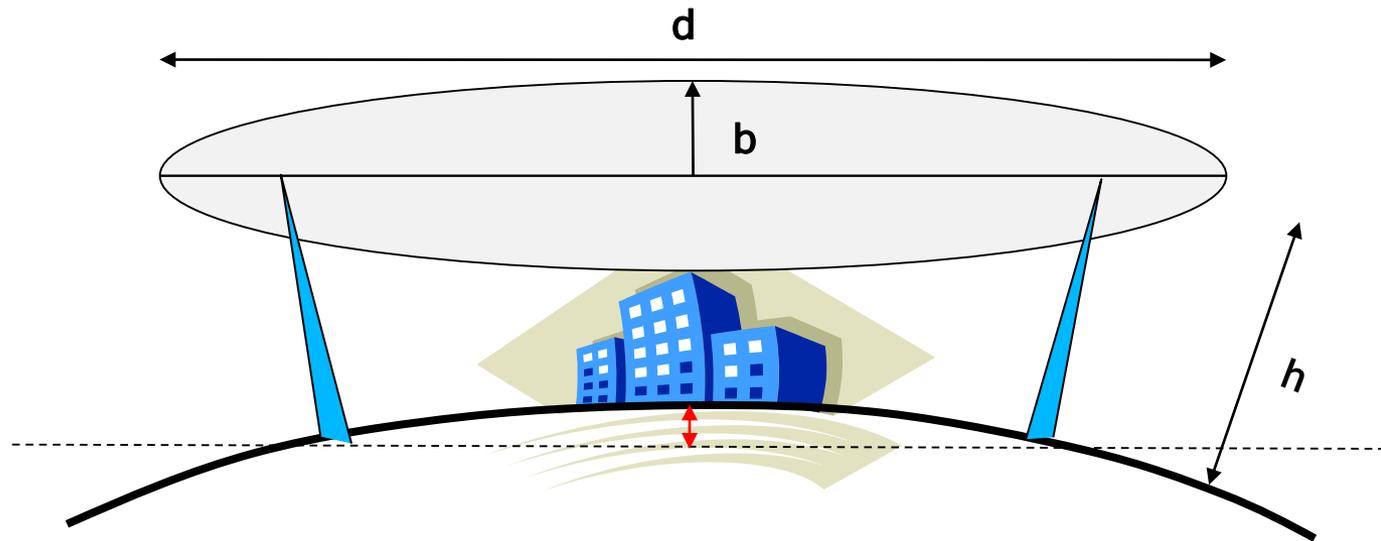
Fresnelzonenausbildung (**Ellipsoide**)

- **n. Fresnelzone** umfasst alle Raumpunkte, deren Zielwegdifferenz gegenüber dem direkten Weg maximal n halbe Wellenlängen beträgt
- In der 1. Fresnelzone ist die Hauptsendeenergie konzentriert.
→ Durchdringung problematisch (evtl. höhere Antennen erforderlich)



Fresnelzone [2]

große Sendeentfernungen → Erdkrümmung berücksichtigen !



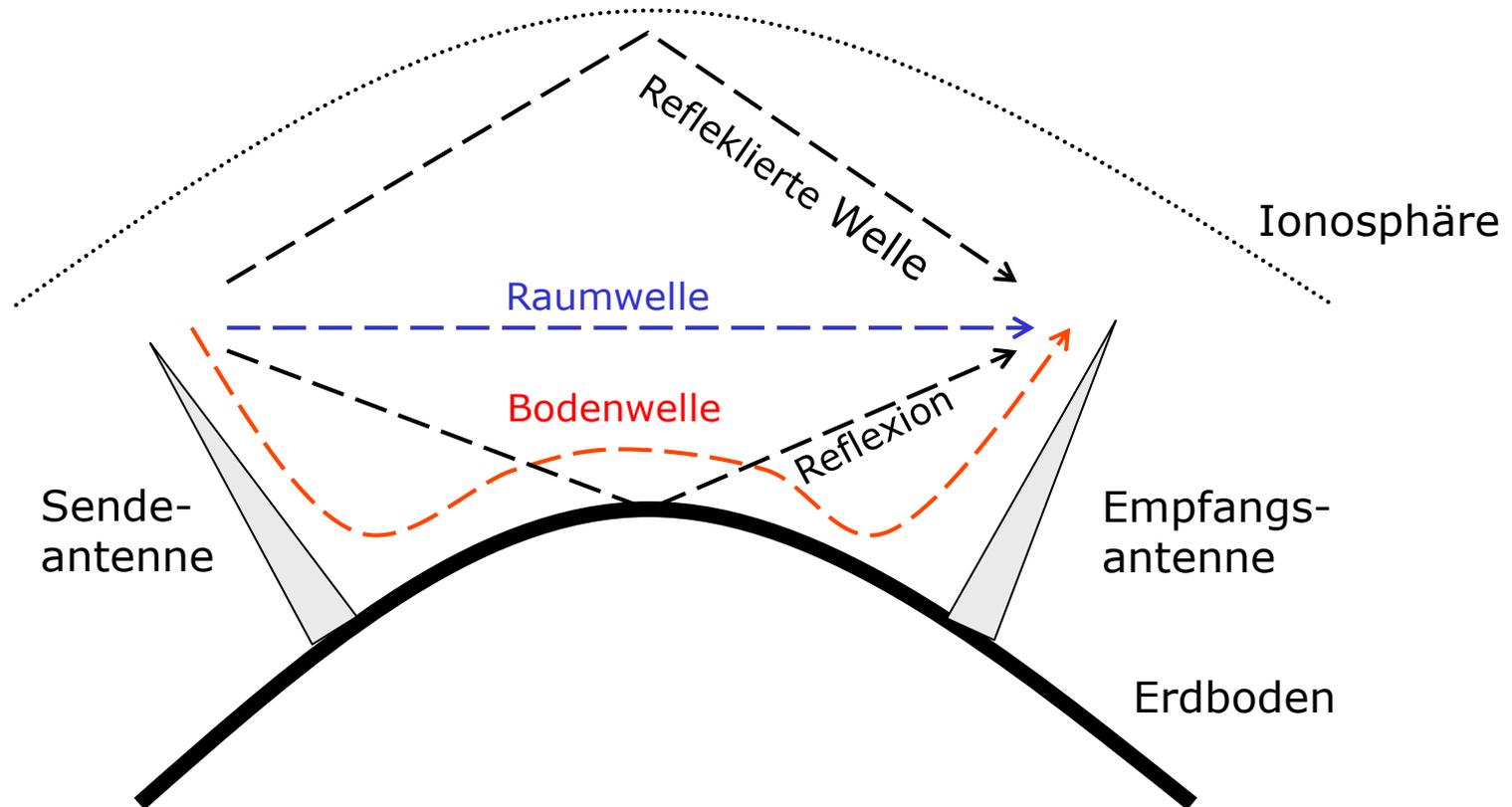
$$b = 0,5 * \sqrt{\lambda * d}$$

↑
Wellenlänge

$$h_{\min} = h_i + b + \frac{d^2}{8 * R}$$

← Erdradius

Ausbreitung in der Atmosphäre

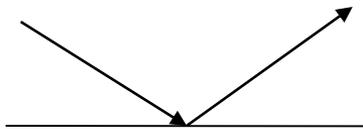


Elektromagnetische Wellen [3]

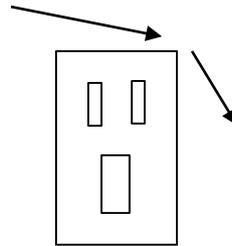
Wellenlänge	Band		Eigenschaften, wellenlängenabhängig
100 ... 10 km	VLF	very low frequency	<p><i>mit kürzerer Wellenlänge (höherer Frequenz)</i></p> <p>steigende Bedeutung der Raum- gegenüber der Bodenwelle</p> <p>ab UHF Ausbreitung strahlenförmig,</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schatten bei Hindernissen in der Größenordnung der Wellenlänge und kleiner (im EHF sogar Regen, Nebel, ...) • Überhorizontverbindung durch Beugung, Streuung und Reflexion • Störungen durch Resonanzen mit Molekülen (Wasserdampf, ...)
10 ... 1 km	LF	low frequency	
1000 .. 100 m	MF	medium frequency	
100 ... 10 m	HF	high frequency	
10 ... 1 m	VHF	very high frequency	
100 ... 10 cm	UHF	ultra high frequency	
10 ... 1 cm	SHF	super high frequency	
10 ... 1 mm	EHF	extremely high frequency	
1000 .. 780 μm → immer lichtähnlichere Eigenschaften	Infrarotstrahlung		

Effekte bei Funkausbreitung

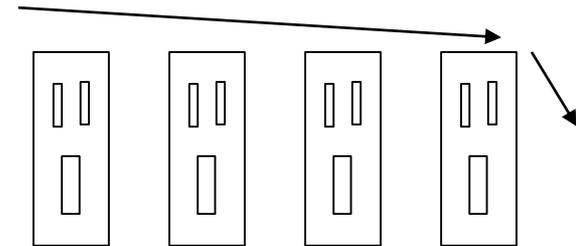
Reflexion



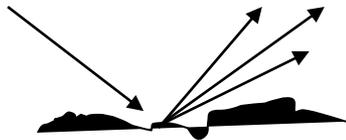
Beugung



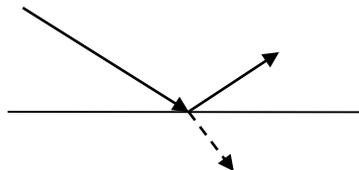
Mehrfachbeugung



Streuung



Absorption



Wellenführung



Radio wave propagation models

Berechnung der Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Wellen als Funktion

- der Frequenz
- des Abstandes zwischen Sender und Empfänger
- geometrischer Rahmenbedingungen
- elektromagnetischer Störeinflüsse
- konstruktiver Eigenschaften,
z.B. Sendeleistung, Antennenformen

Schwerpunkt: Berechnung des Pfadverlustes
(Dämpfung der Leistungsdichte)

Zielstellung

- Unterstützung der Entwicklung neuer Funktechnologien
- Unterstützung der Planung von Funknetzen
Vorhersage für Versorgungsbereiche mit guter Empfangsqualität
Optimierung Sendestandorte, -leistungen, -frequenzbereiche

Modellierung

Genauigkeit

- Exakte Berechnungen auf Basis der Maxwell'schen Gleichungen extrem schwierig für nichttriviale Modelle (Rechenaufwand)
- Veränderungen der Umgebung haben u.U. erheblichen Einfluß, (z.B. Errichtung eines Gebäudes in einer Stadt → Funkschatten) deshalb Rechenergebnisse nur temporär gültig

→ Sinnvolles Vorgehen:

Math. Modell gegenüber Realität vereinfachen

Validierung der Modelle durch Messungen bei typischen Einsatzfällen

Sicherheitsreserven einplanen

Klassifizierung der Modelle

empirisch	erfahrungsbasiert, ohne Berücksichtigung der Umgebung, Modelle einfach und ungenau
deterministisch	aufwendig, relativ genau, Umweltberücksichtigung feldtheoretische bzw. strahlenoptische Modelle
semiempirisch	Mischform, Umweltberücksichtigung in vereinfachter Form

Deterministische Modelle

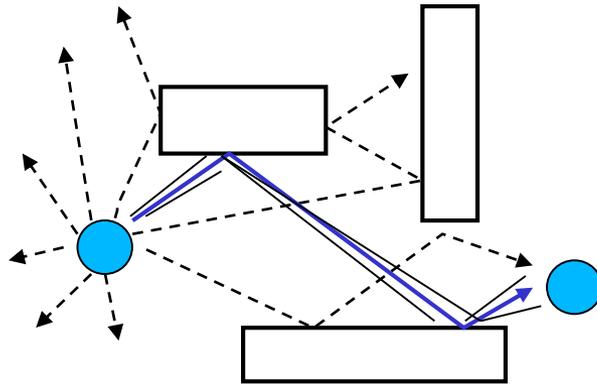
theorie-basiert, u.U. sehr rechenaufwendig

- **feldtheoretische Modelle**
Lösung elektromagnetischer Gleichungen (extrem schwierig)
- **strahlenoptische Modelle**
Berechnung von optischen „Strahlen“-Verläufen
vom Sender zum Empfänger und der zugehörigen Energieverluste

Standardmethode, Berücksichtigung von
gegebener Geometrie, Reflexionen, Brechungen, ...
falls $f < 10$ GHz auch von Strahlenbeugungen
(empirische Modelle berücksichtigen nur Dämpfungen)

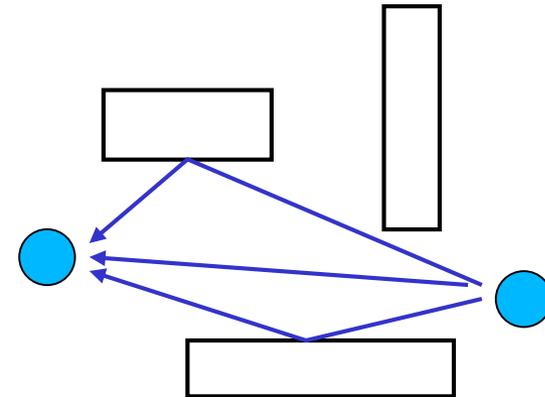
- Vorteile
höhere Genauigkeit als empirische Modelle,
insbesondere realistischere Ergebnisse für hohe Frequenzen
geringerer Rechenaufwand als feldtheoretische Modelle
- 2 Ansätze: Ray Tracing und Ray Launching

Ray Launching vs. Ray Tracing



ray launching

von einem Quellpunkt werden in alle Richtungen (isotrop) die Strahlenverläufe und die (evtl.) resultierende Empfangsenergie berechnet



ray tracing

vom Empfangspunkt werden rückwärts mögliche Strahlenverläufe zum Sender ermittelt und danach die Energieverluste berechnet

Ray Launching (RL)

Sender emittiert n gleichmäßig über 360° verteilte sog. Zentralstrahlen, die jeweils ein Bündel von Einzelstrahlen repräsentieren und eine Strahlenröhre mit einem Öffnungswinkel $360^\circ/n$ darstellen

Algorithmus

Startwinkel einstellen

Zyklus: Berechnen Strahlverlauf und zugehörige Dämpfung
 Winkelerhöhung
 Abbruch nach Berechnung aller Strahlen

Signalstärke am Empfänger berechnet durch Addition der Signalstärken der den Empfangspunkt berührenden Strahlröhren

bei kleinen Winkelinkrementen Genauigkeit, aber auch Rechenaufwand hoch

→ Verwerfen von Strahlen, die unter Signalstärke-Schwellwert fallen
Verwerfen von Strahlen, die das betrachtete (Teil-)Gebiet verlassen
Begrenzung der Interaktionsanzahl (Reflexionen, ...)

Beispiel für RL Modell: 2D Urban Pico Model (AWE Communications)

Ray Tracing (RT)

Ähnlich Berechnungsverfahren für Lichtverteilung in Computergrafik

Algorithmus

Für jeden interessierenden Empfangspunkt werden alle möglichen Strahlenpfade zur Strahlenquelle ermittelt. Dabei werden Reflexionen, Streuung, ...berücksichtigt.

Danach erfolgt für jeden ermittelten Strahlenpfad vom Sender ausgehend die Berechnung der Signaldämpfung. Die Signalstärke am Empfänger wird durch Addition der Signalstärken der den Empfangspunkt berührenden Strahlen berechnet.

liefert hochauflösende Prognose der Empfangsfeldstärke, hohe Rechenzeit.

→ Begrenzung der Interaktionsanzahl (Reflexionen, ...) pro Strahl, z.B. Verwerfen Strahlen mit mehr als 10 Interaktionen

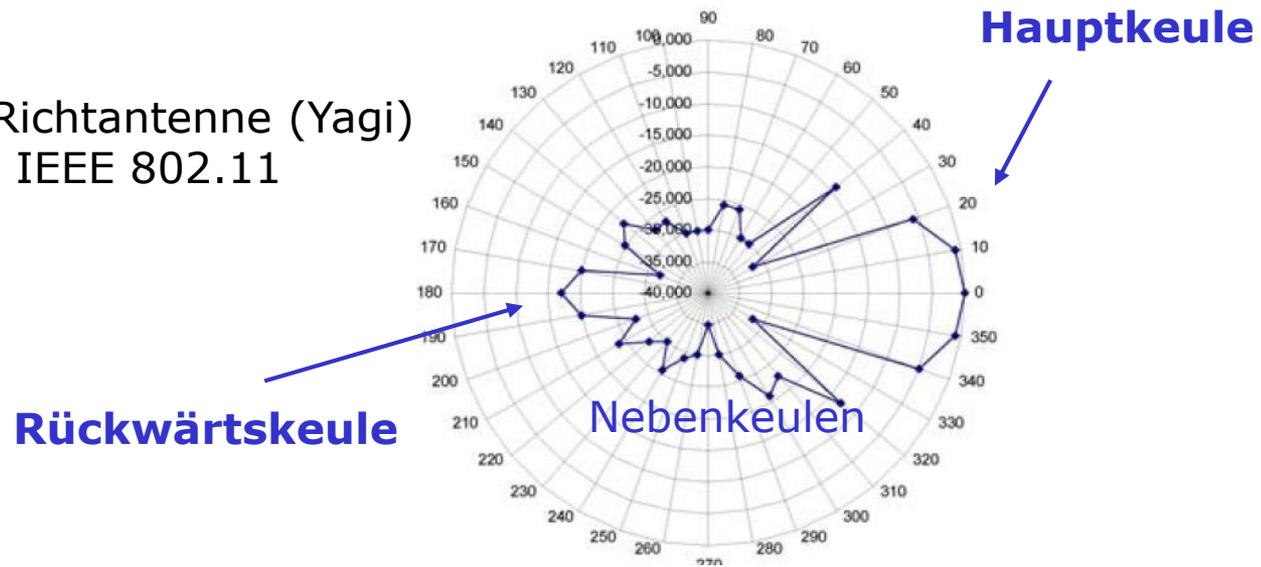
Beispiel für RT-Modell:

3D Urban Micro Model (AWE Communications).

Richtfaktor und Antennengewinn

Richtantennen strahlen die Energie ungleichmäßig ab

typische Richtantenne (Yagi)
für WLAN IEEE 802.11



Richtfaktor = Sendeleistung im Verhältnis zum Kugelstrahler

Gewinn [dBi] = $10 * \lg(\text{Richtfaktor})$

EIRP (Effective Isotropic Radiated Power)

Reglementierung der Sendeleistungen erforderlich

- Begrenzung der Sendereichweite
- Strahlenschutz

Reglementiert wird

- nicht die Leistung der Antenne
- sondern die Leistung in der stärksten Abstrahlungsrichtung.

$$EIRP[dBm] = 10 \lg \left(\frac{\text{Sendeleistung}}{mW} \right) + \frac{\text{Gewinn}}{dBi}$$

z.B.

$\lambda/2$ -Dipol mit	Gewinn =	2,15 dBi	
Begrenzung	EIRP =	20 dBm	(100 mW)

→ max. Sendeleistung = 17,85 dBm

Antennentechnik

- isotroper Kugelstrahler, Punktstrahler, (nur theoretisches Interesse)
- lineare Antennen, z.B. $\lambda/2$ -Dipol
- Flächenantennen, z.B. Reflektorantennen

Omnidirektionale Antennen

- Öffnungswinkel von 360° horizontal (horizontaler Rundstrahler)
- Sendekeule auf vertikal gestaucht, beispielsweise auf 80° .
- horizontale Reichweitensteigerung, Gewinn meist 2 ... 5 dB

Patch Antennen

- horizontaler und vertikaler Öffnungswinkel von 80° bis 65°
- Reichweitensteigerung bis zu 100%, Gewinn meist 4 ... 10 dB

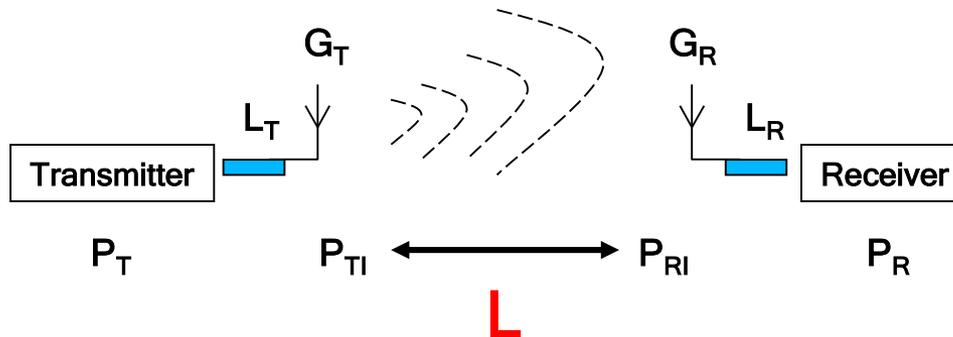
Yagi Antennen

Parabolantennen

- Richtfunk Antennen
- hoher Gewinn, Richtfunkstrecken mit hoher Reichweite

Link budget

Leistungsbilanz auf dem Weg vom Sender zum Empfänger



P_T
 P_{TI}
 P_{RI}
 P_R

gesendete Leistung
 abgestrahlte Leistung
 aufgenommene Leistung
 empfangene Leistung

L_T
 G_T
 G_R
 L_R
 L

Verlust Sendeleitung, ...
 Gewinn Sendeantenne
 Gewinn Empfangsantenne
 Verlust Empfangsleitung, ...
Pfadverlust

$$L_{PT} - L_T + L_{GT} - L + L_{GR} - L_R = L_{PR}$$

Addition der Logarithmen der Verluste/Gewinne
Maßeinheit: dB

Pfadverlust (path loss)

$$\frac{L}{dB} = 10 \times \lg(P_{TI} / P_{RI})$$

Signaldämpfung (attenuation), wegen

- Ausbreitung im Raum (space propagation)
Freiraumdämpfung, Wechselwirkung mit Luftmolekülen, Wasser, ...
- Streuung (scattering)
- Reflexion (reflexion) und Brechung (refraction)
- Beugung (diffraction)

Pfadverlust für Freiraumdämpfung

$$\frac{L_{FS}}{dB} = 10 * \lg\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 = 32,44 + 20\lg\left(\frac{f}{MHz}\right) + 20\lg\left(\frac{R}{km}\right)$$

Elektromagnetische Wellen - Dämpfungseinflüsse

Pfadverlust =

Pfadverlust-Freiraum
+ atmosphärische Dämpfung
+ Polarisationsdämpfung
+ Ausrichtungsdämpfung
- Antennengewinn
+ ...

(Vakuum)

(Wasser, Sauerstoff, ...)

(Polarisationsebenenänderung)

(evtl. falsche Antennenausrichtung)

(Hindernisse)

Praktische Berechnung des Pfadverlustes im Freiraum

$$L/\text{dB} = 32,44 + 20 \lg (f/\text{MHz}) + 20 \lg (R/\text{km})$$

Abschätzung der des atmosphärischen Dämpfung (Wasser, Sauerstoff, ...)

+ bei mäßigem Regen

bei 2,4 GHz

ca. 0,01 dB/km (+ 0,003 dB/km)

bei 10,5 GHz

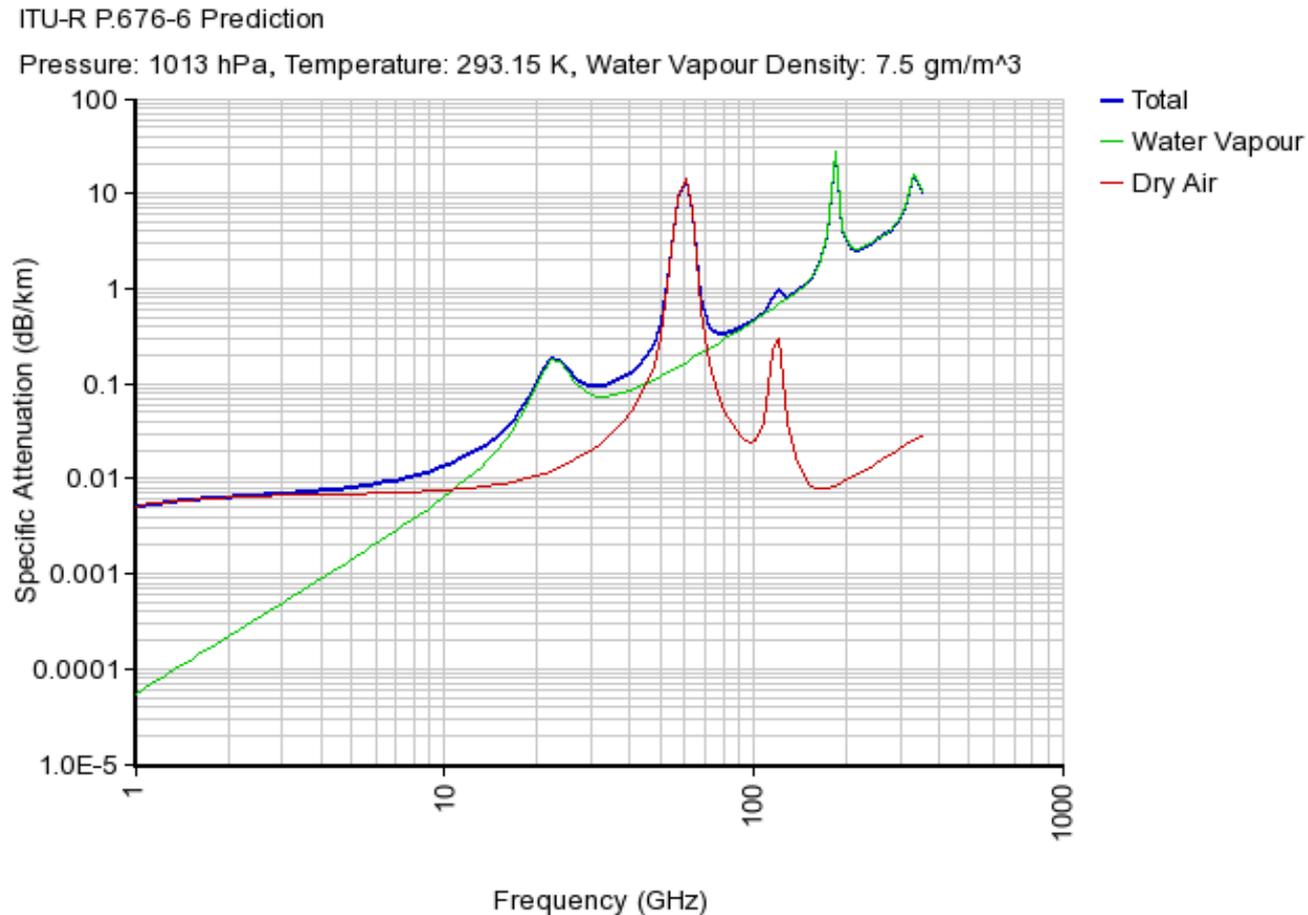
ca. 0,02 dB/km (+ 0,3 dB/km)

bei 22 GHz

Problemzone wegen Resonanzfrequenz H₂O

ITU-R Modell für Dämpfung in Luft

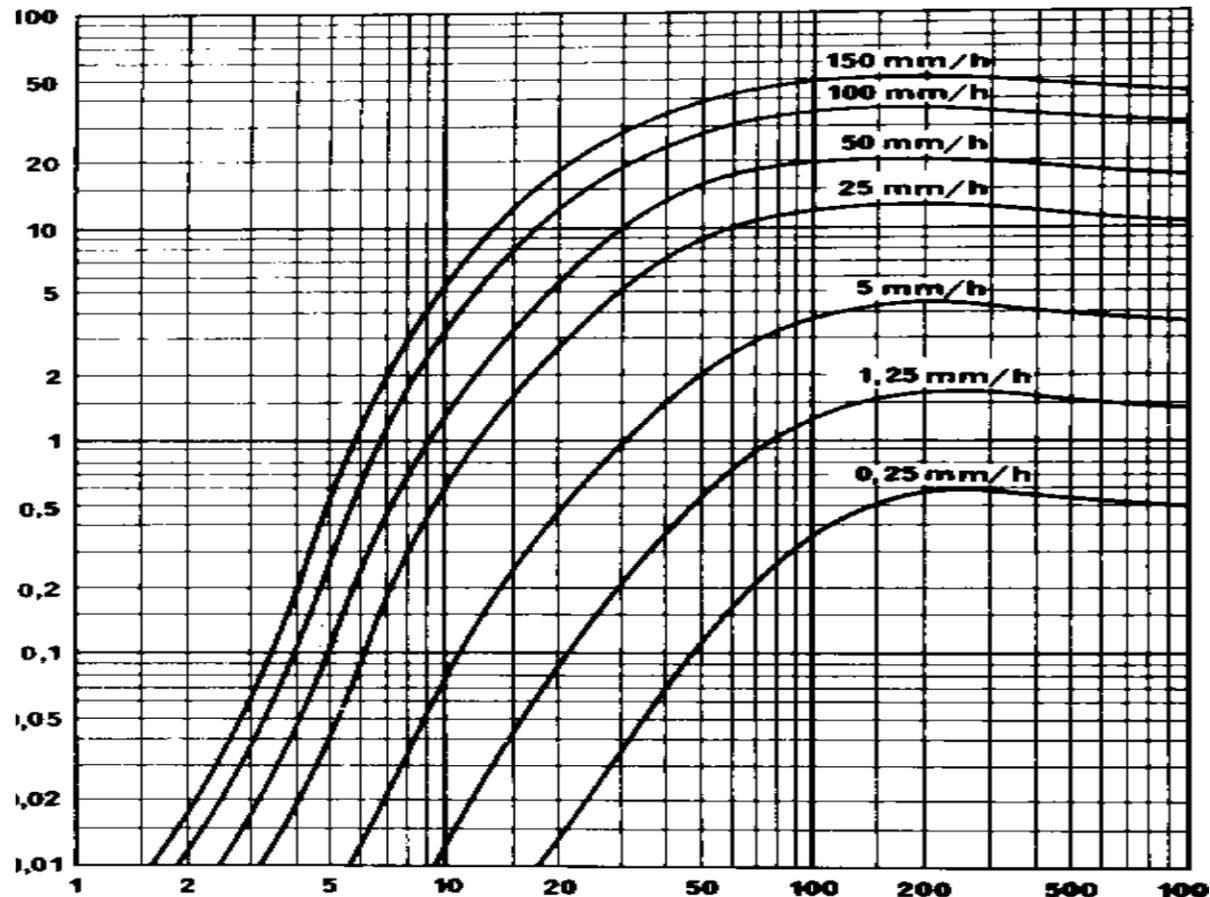
<http://www.rcru.rl.ac.uk/show.php?page=njt/ITU/ITU676-6>



Dämpfung durch Regen

Alain Delrieu: Meeting for World Radiocommunication Conference 2007, Bangkok

Dämpfung
[dB/km]



f/GHz

Einplanung von Sicherheitsreserven

einige weitere Dämpfungsfaktoren beim Mobilfunk

- Gebäudedämpfung (5 ... 37 dB), abh. von Größe, Form, Material

Mittelwerte: 15 dB Haus 12 dB Fenster

- Absorptionsverluste im Körper (6 ... 9 dB)

- im Fahrzeuginneren (6 dB)

- Mehrwegeempfangseinflüsse (Fade Margin)

11 dB für große Funkzellen,

8 dB für kleine Funkzellen

5 dB für Abschattungen

→ Reserve einplanen, ca.

20 dB + Fade Margin

Dämpfungseinflüsse / Beispiel

Beispiel für Berechnung des Pfadverlustes bei

Luftausbreitung, starker Regen

Frequenz 6 GHz

Reichweite 5 km

Pfadverlust durch Freiraumdämpfung

$$121,9 \text{ dB} = 32,44 + 20 \cdot \lg(6000) + 20 \cdot \lg(5)$$

+ Pfadverlust durch atmosphärische Dämpfung und starken Regen

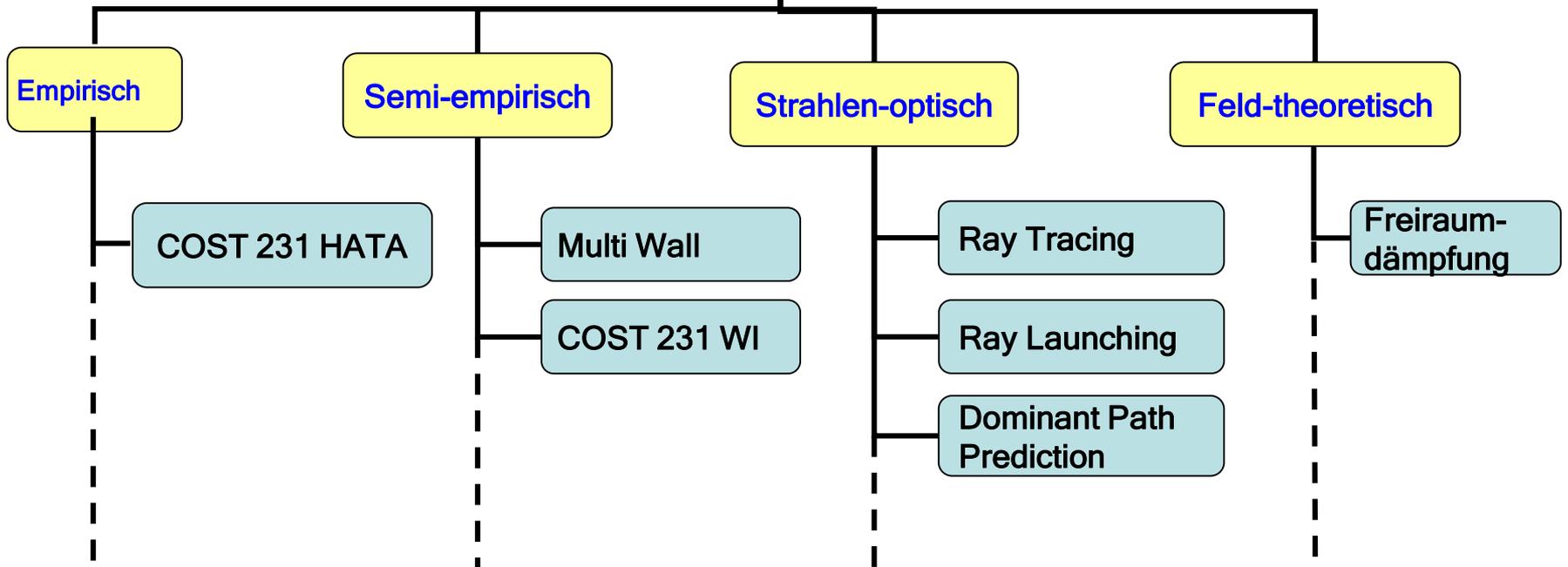
$$25,1 \text{ dB} = 5\text{km} \cdot 0,02\text{dB/km} + 5\text{km} \cdot 5\text{dB/km}$$

+ 20 dB Sicherheitsreserve

$$\rightarrow L \approx 167\text{dB}$$

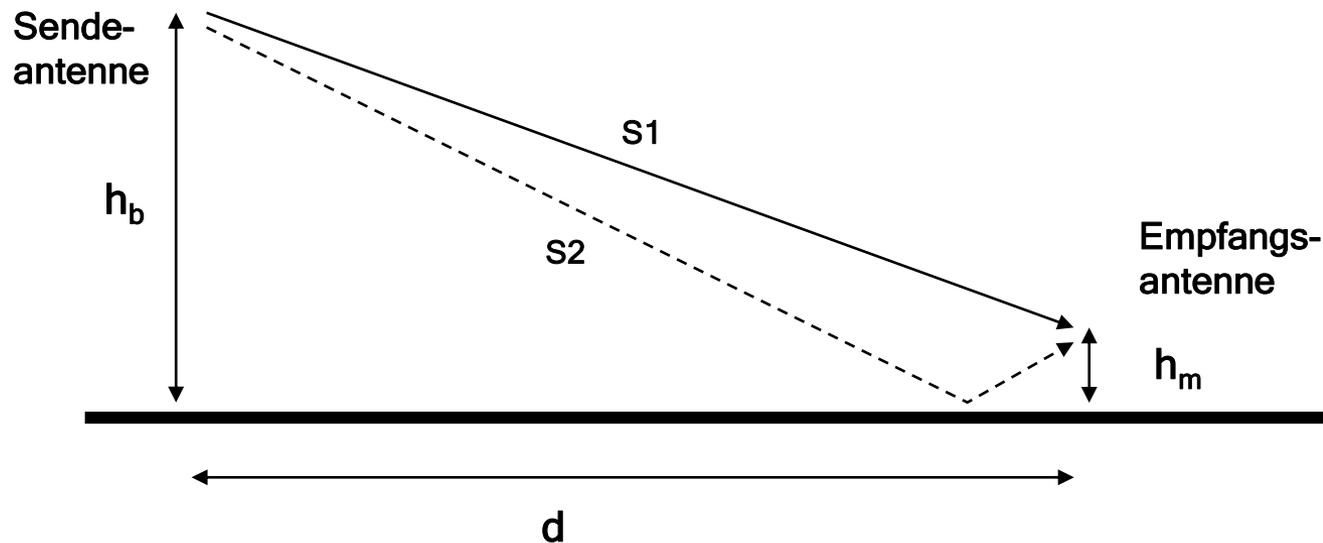
Funkausbreitungsmodelle

Algorithmenklassifizierung



Plane Earth Modell

Deterministisches Modell mit Berücksichtigung Erdoberflächenreflexion



Strahl $S1$ breitet sich aus mit Freiraumdämpfung

Strahl $S2$ stärker gedämpft, wegen Reflexionsverlust und längerem Weg

Energiedichte darf nicht einfach addiert werden !

Interferenz wegen Zeitverschiebung,
u.U. sogar (fast) Auslöschung bei Verschiebung um $\lambda/2$

Plane Earth Modell - Pfadverlust

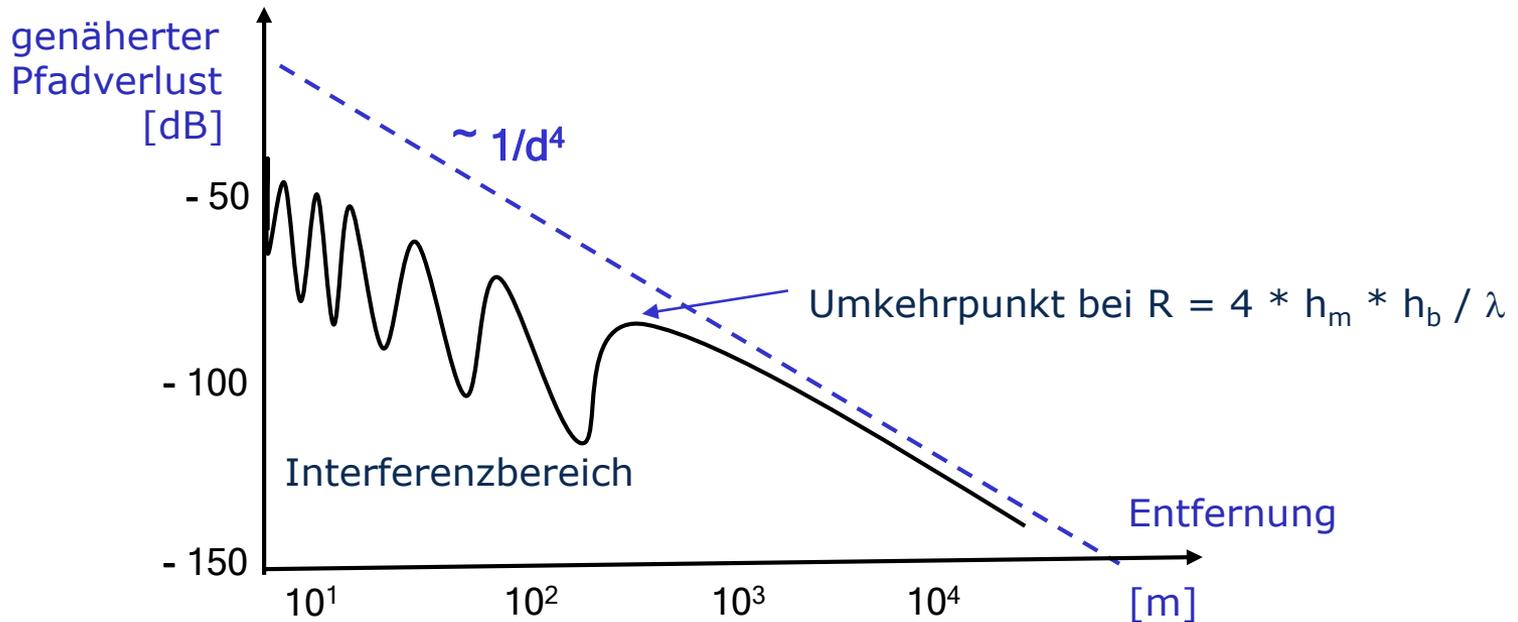
$$\frac{P_{TX}}{P_{RX}} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \times \left| 1 - e^{-jk(\lambda)\Delta r(d)} \right|^{-2}$$

mit

$$k = 2\pi/\lambda$$

$$\Delta r = 2 * h_b * h_m / d$$

bei $f=900$ MHz, $h_m = 1,5$ m, $h_b = 30$ m



Plane Earth Modell - Pfadverlust für $h_m, h_b \ll d$

$$\frac{P_{TX}}{P_{RX}} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \times \left| 1 - e^{-j \frac{4\pi h_b h_m}{\lambda d}} \right|^{-2}$$

$$\left| \dots \right|^2 = (1 - \cos(\dots))^2 + \sin^2(\dots)$$

für $h_m, h_b \ll d$

gilt $\cos(\dots) \approx 1$
 $\sin(\dots) \approx (\dots)$

$$\frac{P_{TX}}{P_{RX}} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \times \left(\frac{4\pi h_b h_m}{\lambda d} \right)^{-2} = \left(\frac{d^2}{h_b h_m} \right)^2$$

Pfadverlust

$$L = 10 \lg(P_{TX}/P_{RX})$$

$$\frac{L_{PEL}}{dB} = 40 \lg\left(\frac{d}{m}\right) - 20 \lg\left(\frac{h_m}{m}\right) - 20 \lg\left(\frac{h_b}{m}\right)$$

**unabhängig
von Wellenlänge !!!**

Plane Earth Modell - Praxistauglichkeit

Faustregel: Verdopplung der Antennenhöhe → 6 dB Gewinn
Verdoppelung der Entfernung 12 dB Verlust

Messungen: Energiedichte fällt ab mit $p \sim 1/d^x$ (mit $x = 2 \dots 5$)
bei plane earth Modell $x = 4$
in Stadtgebieten geringer,
z.B. $x = 3,2 \rightarrow L = 32 \lg(d/m) + \dots$

Grund: Bodenbeschaffenheit reduziert Einfluß reflektierter Welle

Plane Earth Modell nach Egli mit Korrektur für Frequenzeinfluß

$$\frac{L_{PEL}}{dB} = 40 \lg\left(\frac{d}{m}\right) + 20 \lg\left(\frac{f}{40 \text{ Mhz}}\right) - 20 \lg\left(\frac{h_m}{m}\right) - 20 \lg\left(\frac{h_b}{m}\right)$$

→ **Beurteilung der Relevanz der Modelle ist sehr schwierig**

Einteilung in Sendeversorgungsgebiete

Interferenzen bei Mehrwegeausbreitung
und beim Senden mehrerer Stationen auf gleicher Frequenz

→

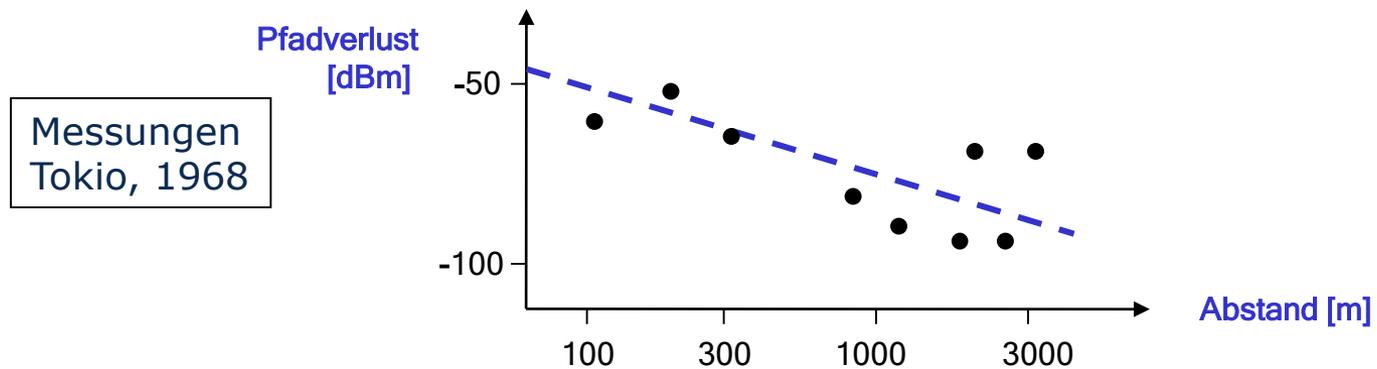
- Einteilung in Sendegebiete (Zellen) mit gleicher Sendefrequenz
- Frequenzplanung – Nachbarzellen mit unterschiedlichen Frequenzen
- Begrenzung der Sendeleistung auf Versorgungsgebiet
(plus Sicherheitsreserve in Nachbarzellen)

Bezeichnung	Gebiet	Antennenposition
Picozelle	innerhalb von Gebäuden bis ca. 100 m	mittlere Etagenhöhe
Mikrozelle	außerhalb von Gebäuden 20 ... 1km	unter mittlerer Dachhöhe
Kleinzelle	Häuseransammlung 0,5 ... 3km	mittlere Gebäudehöhe
Makrozelle	Häuseransammlung 1 ... 30 km	über höchstem Gebäude
...	global	Weltraum

Okumura-Hata Modell [1]

empirisches Modell zur Berechnung des Pfadverlustes in Makrozellen

Frequenzbereich	150 ... 1500 MHz
Sendeantennenhöhe	30 ... 200 m
Empfangsantennenhöhe	1 ... 10 m
Abstand Sender-Empfänger	1 ... 20 km



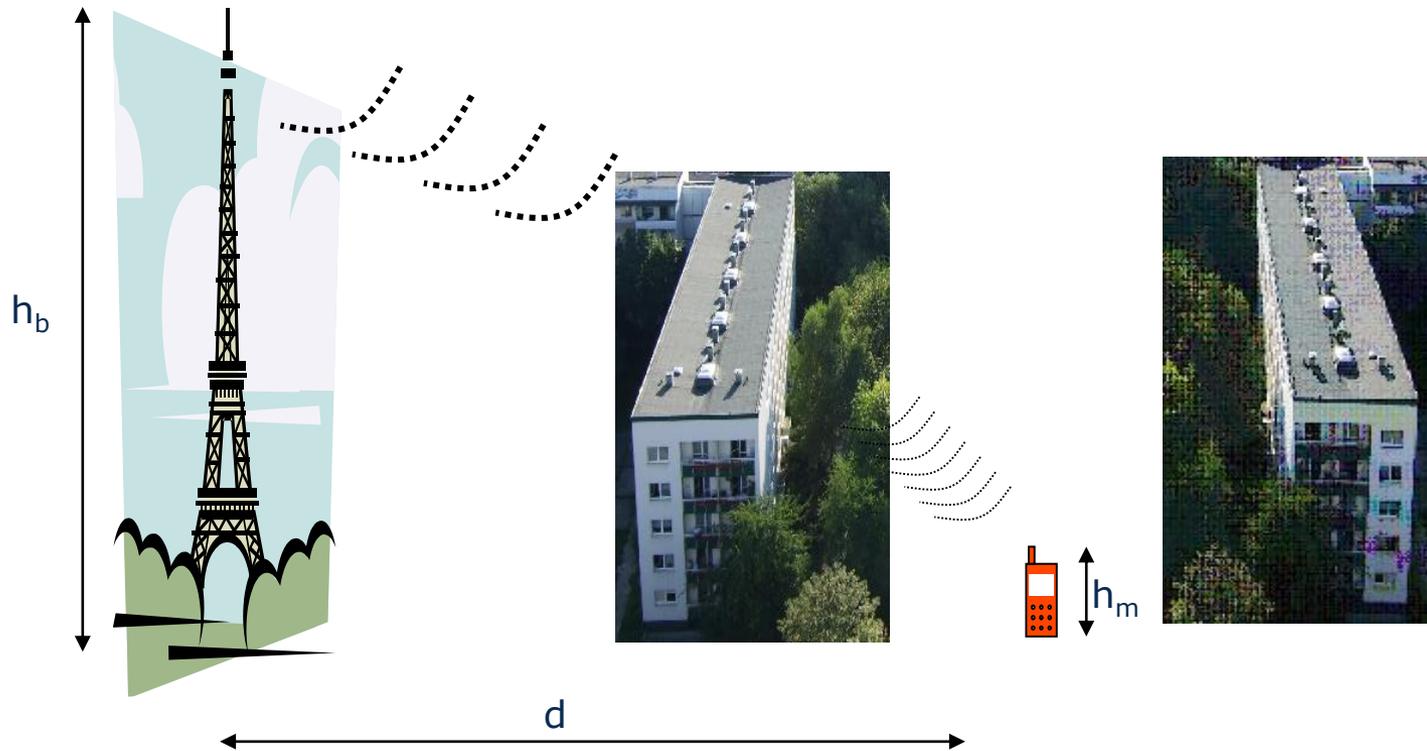
Meßwerteanpassung an verschiedene Vorhersagebereiche

rural open area
rural quasi open area
suburban area
urban area

offene Gebiete, keine Bäume und Gebäude
leichte Bebauung
mittlere Bebauung
starke Bebauung

Okumura-Hata Modell [2]

h_m Höhe Empfängerantenne [m]
 h_b Höhe Sendeantenne [m]
 d Abstand Antenne - Empfänger [km]
 f Sendefrequenz [MHz]



Okumura-Hata Modell [3]

Formelanpassung je nach Bereichstyp

$$\text{urban area} \quad L_{dB} = A + B \cdot \log_{10} d - E$$

$$\text{suburban area} \quad L_{dB} = A + B \cdot \log_{10} d - C$$

$$\text{open area} \quad L_{dB} = A + B \cdot \log_{10} d - D$$

$$A = 69,55 + 26,16 \log_{10} f - 13,82 \log_{10} h_b$$

$$B = 44,9 - 6,55 \log_{10} h_b$$

$$C = 2 * (\log_{10} (f/28))^2 + 5,4$$

$$D = 4,78 * (\log_{10} f)^2 - 18,33 \log_{10} f + 40,94$$

$$\begin{aligned} E &= 3,2 * (\log_{10} (11,7554 h_m))^2 - 4,97 \\ &= 8,29 * (\log_{10} (1,54 h_m))^2 - 1,1 \\ &= (1,1 \log_{10} f - 0,7) * h_m - (1,56 \log_{10} f - 0,8) \end{aligned}$$

für große Städte, $f \geq 300\text{MHz}$
für große Städte, $f < 300\text{MHz}$
für mittlere bis kleine Städte

COST 231 - Hata Modell

1999 Erweiterung des Okumura-Hata Modells für mittlere bis kleine Städte für Frequenzbereich 1500 ... 2000 Mhz

$$L_{dB} = F + B \cdot \log_{10} d - E + G$$

mit

$$F = 46,3 + 33,9 \log_{10} f - 13,82 \log_{10} h_b$$

$$G = \begin{cases} 0 \text{ dB} & \text{mittlere Städte und suburbane Bereiche} \\ 3 \text{ dB} & \text{Großstädte} \end{cases}$$

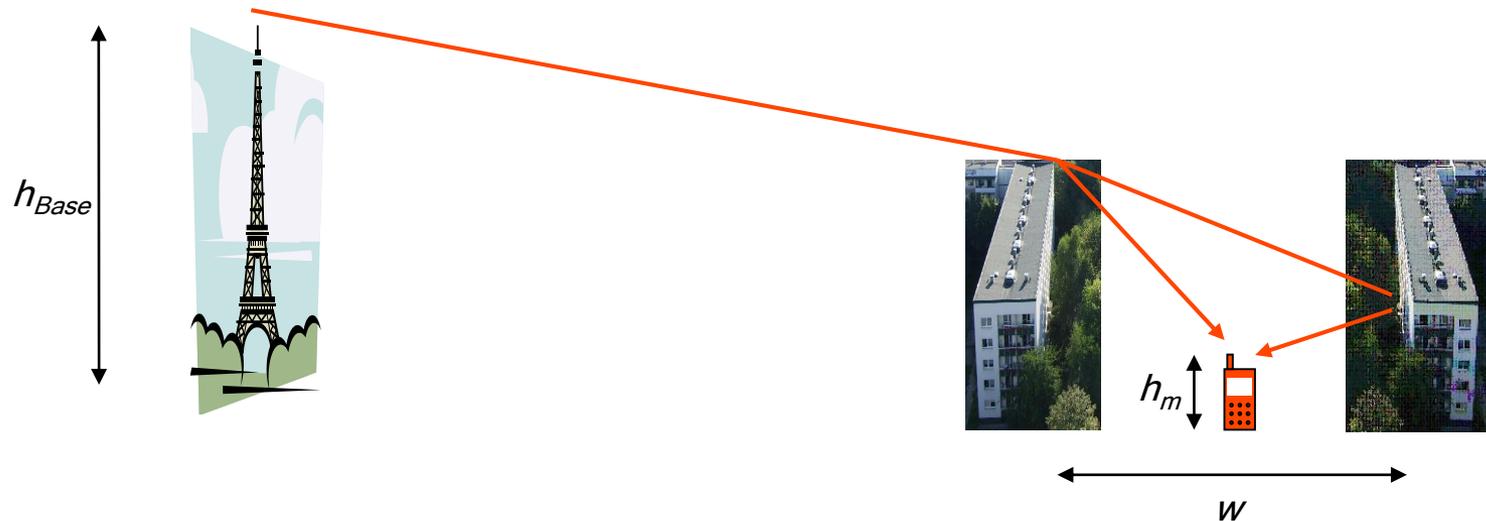
Genauigkeit
der empirischen Ausbreitungsmodelle Okumura-Hata und COST 231-Hata

Normal Fehler 5 ... 7 dB

Sonderfälle Fehler 15 dB und mehr

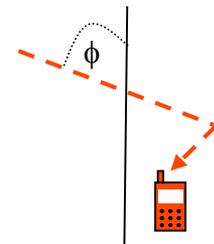
Ikegami Modell [1]

deterministisches Modell zur Berechnung des Pfadverlustes in Kleinzellen



Berücksichtigung

- Straßenbreiten
- Antennenhöhen
- Abschattungen
- 2 Strahlwege (Einfachbeugung und -reflexion)
- Einfallswinkel



Ikegami Modell [2]

w	Straßenbreite [m]
h_m	Höhe Empfängerantenne [m]
h_{Base}	Höhe Sendeantenne [m]
f	Sendefrequenz [MHz]
ϕ	Horizontaler Einfallswinkel

L_r	Reflexionsverlust	0.25
-------	-------------------	------

$$\frac{L}{dB} = 10\lg\left(\frac{f}{MHz}\right) + 10\lg(\sin \phi) + 20\lg\left(\frac{h_{Base} - h_m}{m}\right) - 10\lg\left(\frac{w}{m}\right) - 10\lg\left(1 + \frac{3}{L_r^2}\right) - 5,8$$

Das Ikekami-Modell unterschätzt den Pfadverlust bei hohen Distanzen und den Frequenzeinfluß

→ empirische Ergänzungen erforderlich

COST 231-Walfisch-Ikegami Modell [1]

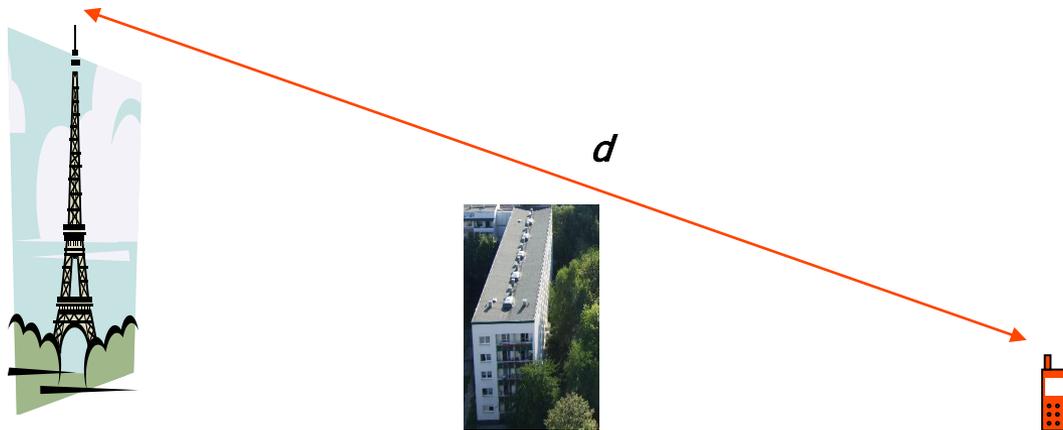
semiempirisches Modell zur Berechnung des Pfadverlustes in Kleinzellen

2 Teilmodelle

Sichtverbindung	LOS	(line of sight)
keine Sichtverbindung	NLOS	(non line of sight)

Pfadverlust für LOS

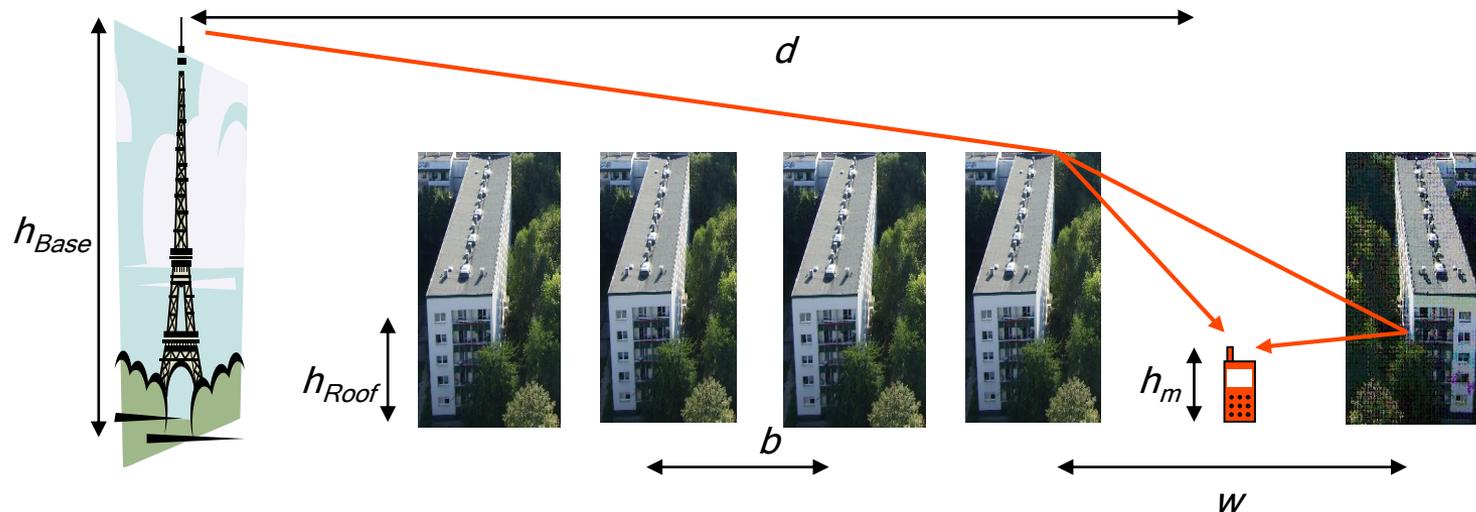
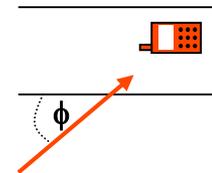
$$\frac{L_{LOS}}{dB} = 42,6 + 26 \lg\left(\frac{d}{km}\right) + 20 \lg\left(\frac{f}{MHz}\right)$$



COST 231-Walfisch-Ikegami Modell [2]

Pfadverlust für NLOS

h_{Roof}	typische Gebäudehöhe [m]	
b	Gebäudeabstand	20...50 m
w	Straßenbreite [m], etwa $b/2$	
h_m	Höhe Empfängerantenne [m]	1 ... 3 m
h_{Base}	Höhe Sendeantenne [m]	4 ... 50 m
d	Abstand Antenne - Empfänger [km]	0,02 ... 5 km
f	Sendefrequenz [MHz]	800 ... 2000 MHz
ϕ	Horizontaler Einfallswinkel	



COST 231-Walfisch-Ikegami Modell [3]

NLOS (non line of sight)

$$L_{NLOS} = L_{FS} + L_{rts}(w, f, h_{Roof}, h_m, \Phi) + L_{MSD}(h_{Roof}, h_{Base}, d, f, b)$$

free
space
loss

roof-to-street
loss

multi diffraction
loss

$$\frac{L_{FS}}{dB} = 32,44 + 20\lg\left(\frac{d}{km}\right) + 20\lg\left(\frac{f}{MHz}\right)$$

$$\frac{L_{rts}}{dB} = -16,9 + 10\lg\left(\frac{f}{MHz}\right) + 20\lg\left(\frac{h_{Roof} - h_m}{m}\right) - 10\lg\left(\frac{w}{m}\right) + L_{ori}$$

street orientation
function

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,35 \Phi & 0 \leq \Phi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075 (\Phi - 35) & 35^\circ \leq \Phi < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114 (\Phi - 55) & 55^\circ \leq \Phi < 90^\circ \end{cases}$$

COST 231-Walfisch-Ikegami Modell [4]

$$\frac{L_{MSD}}{dB} = L_{bsh} + k_a + k_d \lg\left(\frac{d}{km}\right) + k_f \lg\left(\frac{f}{MHz}\right) - 9 \lg\left(\frac{b}{m}\right)$$

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \lg(1 + h_{Base} - h_{Roof}) & h_{Base} > h_{Roof} \\ 0 & h_{Base} \leq h_{Roof} \end{cases}$$

h in [m]
f in [MHz]

$$k_a = \begin{cases} 54 & h_{Base} > h_{Roof} \\ 54 - 0.8 (h_{Base} - h_{Roof}) & d \geq 0,5 \text{ km}, h_{Base} \leq h_{Roof} \\ 54 - 1,6 * d * (h_{Base} - h_{Roof}) & d < 0,5 \text{ km}, h_{Base} \leq h_{Roof} \end{cases}$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & h_{Base} > h_{Roof} \\ 33 - 15 * h_{Base} / h_{Roof} & h_{Base} \leq h_{Roof} \end{cases}$$

$$k_f = -4 + \begin{cases} 0,7 (f / 925 - 1) & \text{medium sized city} \\ 1.5 (f / 925 - 1) & \text{metropolitan center} \end{cases}$$

Dual Slope Modell

empirisches Modell zur Berechnung des Pfadverlustes in Mikrozellen

Einfaches Pfadverlustmodell

mit 2 Steigungen n_1 bzw. n_2
und einem Umkehrpunkt d_b

$$L = \begin{cases} 10n_1 \lg d + L_1 & d \leq d_b \\ 10n_2 \lg (d / d_b) + 10n_1 \lg d_b + L_1 & d > d_b \end{cases}$$

oft genähert in der Form

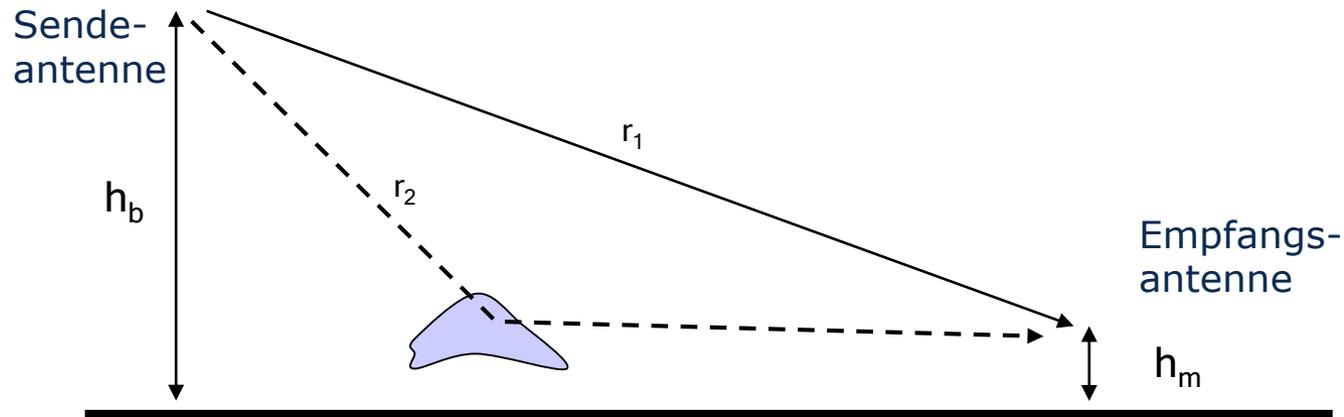
$$L = L_1 + 10n_1 \lg d + 10(n_2 - n_1) \lg (1 + d / d_b)$$

L_1 Referenz-Pfadverlust für $d = 1\text{m}$, z.B. 20 dB
 d_b meist ca. 100 m
 $n_1 = 2$ und $n_2 = 4$ oft große empirische Abweichungen

Two Ray Modell

deterministisches Modell zur Berechnung des Pfadverlustes in Mikrozellen für LOS (line of sight)

Modell ähnelt „plane earth Modell“, aber ungleich lange Strahlenwege



$$\frac{P_{TX}}{P_{RX}} = \left(\frac{4\pi}{\lambda} \right)^2 \times \left| \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + R \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \right|^{-2}$$

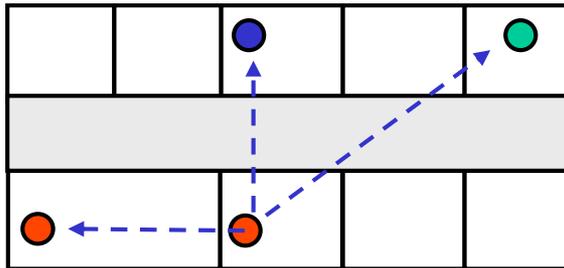
R = Fresnel reflection coefficient

Wall and Floor Factor Modell

empirisches Modell zur Berechnung des Pfadverlustes in Gebäuden (Pikozellen)

Einfaches Pfadverlustmodell, berücksichtigt entlang einer geraden Linie

- Freiraumdämpfung
- plus Dämpfung an Wänden und Geschoßdecken
- keine Berücksichtigung von Reflexionen, Beugungen, Streuungen, ...



z.B.

Strahldämpfung an
1, 2 oder 3 Wänden

$$L = L_1 + 20 \lg d + n_f a_f + n_w a_w$$

a_f	Dämpfung pro Geschoß
a_w	Dämpfung pro Wand
L_1	Referenzpfadverlust für $d = 1\text{m}$

Multi Wall Model

semiempirisches Modell zur Berechnung des Pfadverlustes in Gebäuden (Pikozellen)

$$L_{MWM} = L_0 + 10\gamma \log d + \sum_{i=1}^M L_i$$

L_{MWM}	Multi Wall Dämpfung [dB]
D	Entfernung zwischen Sender und Empfänger [m]
L_0	Referenzdämpfung in 1m Entfernung [dB]
γ	Verlustfaktor
M	Anzahl der Wände zw. Sender und Empfänger
L_i	Verlust durch i-te Wand

Vorteile der Wall-Modelle

- + lineare Komplexität $O(N)$
- + akzeptable Genauigkeit
- + geeignet auch für kombinierte (indoor + outdoor) Szenarien

ITU-R - Wall and Floor Factor Modell

ähnlicher Ansatz

- Floor-Verluste werden berücksichtigt
- Wandverluste werden implizit berücksichtigt (Anpassungen der Parameter)

$$L_T = 20 \log_{10} (f_c / \text{MHz}) + 10n \lg (d/m) + L_f(n_f) - 28$$

Wall and floor factor models - ITU-R models cont.

Table 13.1: Path loss exponents n for the ITU-R model (13.2)^a

Frequency [GHz]	Environment		
	Residential	Office	Commercial
0.9	–	3.3	2.0
1.2–1.3	–	3.2	2.2
1.8–2.0	2.8	3.0	2.2
4.0	–	2.8	2.2
60.0	–	2.2	1.7

^a The 60 GHz figures apply only within a single room for distances less than around 100 m, since no wall transmission loss or gaseous absorption is included.

Table 13.2: Floor penetration factors, $L_f(n_f)$ [dB] for the ITU-R model (13.2)^a

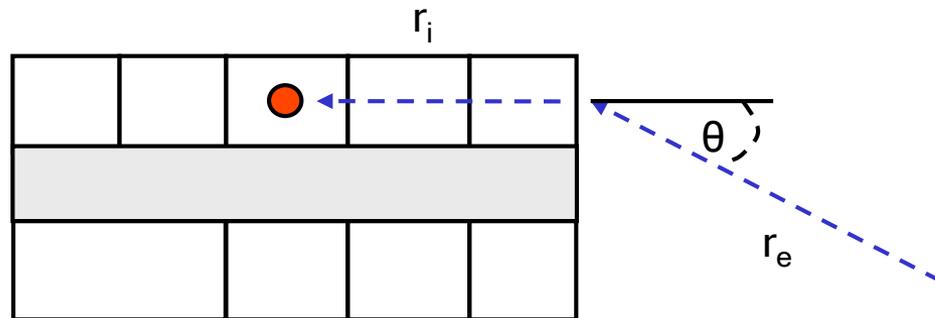
Frequency [GHz]	Environment		
	Residential	Office	Commercial
0.9		9 (1 floor)	
	–	19 (2 floors)	–
		24 (3 floors)	
1.8–2.0	$4 n_f$	$15 + 4 (n_f - 1)$	$6 + 3 (n_f - 1)$

^a Note that the penetration loss may be overestimated for large numbers of floors, for reasons described in Section 13.4.1. Values for other frequencies are not given.

COST 231 LOS-Modell [1]

semiempirisches Modell zur Berechnung des Pfadverlustes in Gebäuden (Pikozellen)

Pfadverlust $L_T = L_F + L_e + L_g (1 - \cos \theta)^2 + \max(L_1, L_2)$



- L_F Freiraumdämpfung für gesamte Strahlänge ($r_i + r_e$)
- L_e Pfadverlust durch Außenwand bei senkrechtem Einfall ($\theta = 0^\circ$)
- L_g Pfadverlust durch Außenwand bei streifendem Einfall ($\theta = 90^\circ$)
- L_i Pfadverlust durch Innenwände
- α Dämpfung für hindernisfreien hausinternen Weg
- n_w Anzahl der passierten Innenwände

$$L_1 = n_w L_i$$

$$L_2 = \alpha (r_i - 2) (1 - \cos \theta)^2$$

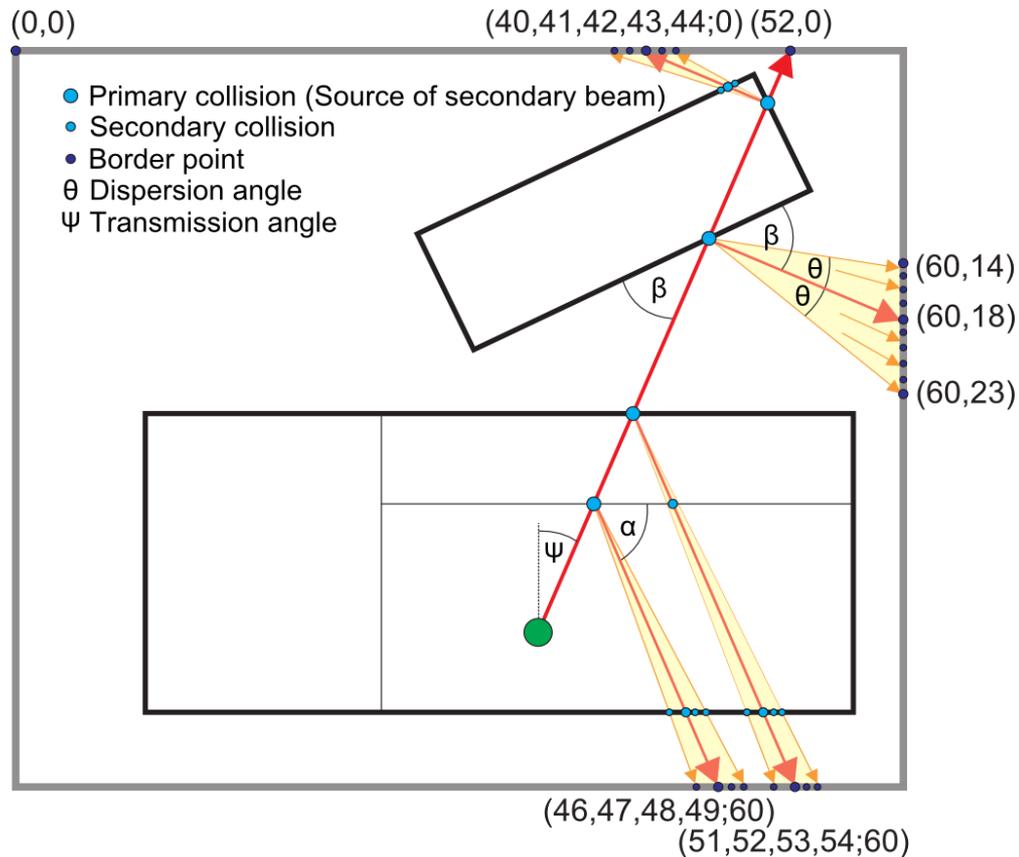
COST231 - LOS [2]

Parameter	Material	Dämpfung ca.
L_e bzw. L_i [dB/m]	Holzwand	4
	Beton mit nichtmetallischen Fenstern	7
	Beton	10 - 20
L_g [dB]		20
α [dB/m]		0,6

Material	2,4 GHz Dämpfung [dB]	5 GHz Dämpfung [dB]
Leichtbeton (11,5 cm)	12	19
Lehmziegel (11,5 cm)	22	36
Kalksandsteinziegel (24 cm)	9,5	23
Stahlbeton (16 cm)	20	32
Ton-Dachziegel (1,3 cm)	3	8

Erweitertes Multi Wall Modell

genaueres Modell
mit Berücksichtigung von Streuungen und Einfach-Reflexionen
(statisch implementiert)



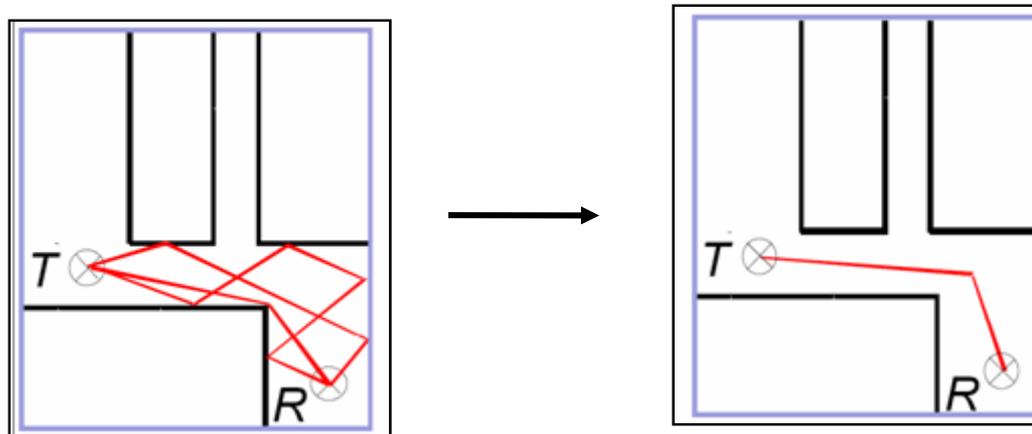
Dominant Path Prediction Model (DPP)

entwickelt durch Universität Stuttgart und AWE Communications GmbH

Beobachtung:

95% der Empfangsenergie über nur 3 Ausbreitungswege

→ dominante Strahlen



Ergebnisse bei geringerem Rechenaufwand
vergleichbar mit anderen strahlenoptischen Modellen

DPP - Berechnung „Corner Tree“ und Dämpfung

dominante Strahlen bilden sich durch Reflexion (Indoor)
bzw. Beugung (Outdoor)

Weg: Direktweg (LOS) bzw. über konkave Ecken

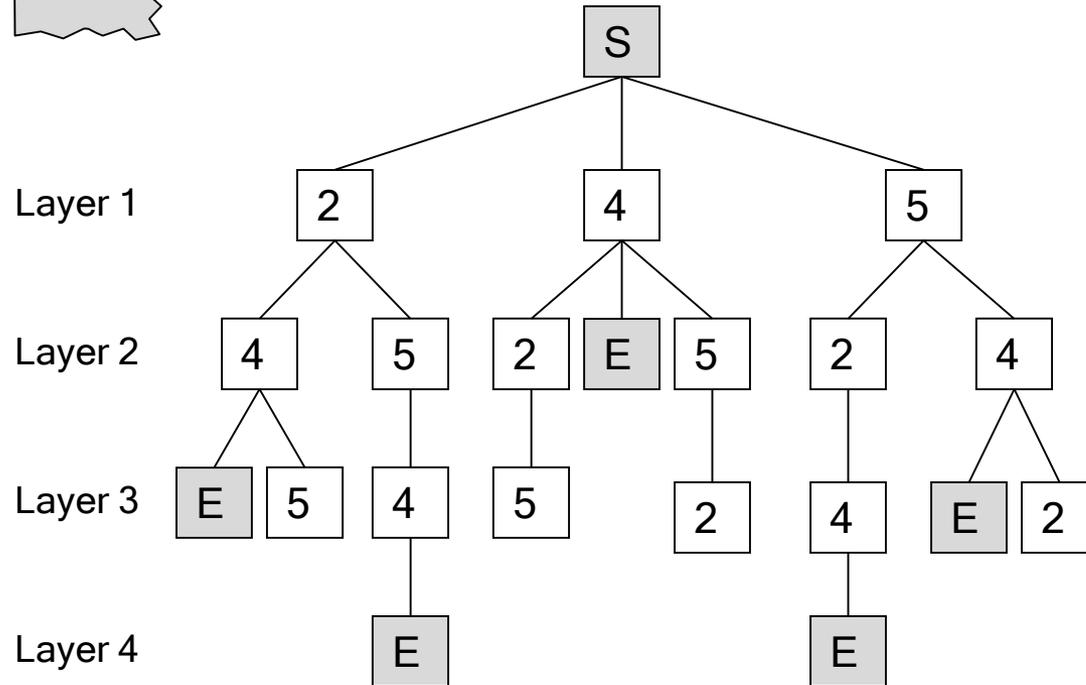
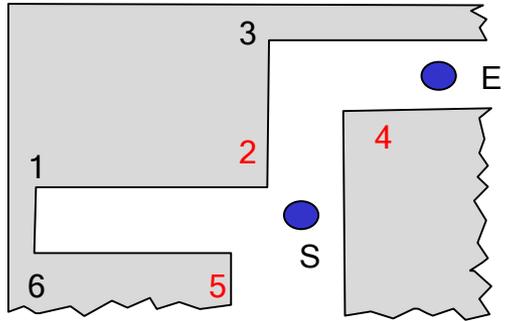
Aufbau „Corner Tree“

- Bestimmung konvexer Ecken
- Sender bildet Wurzel des Baumes
- Ecken mit Sichtverbindung zum Sender bilden 1. Baumebene
- 2. Ebene: Ecken mit Sichtverbindung zu Ecken der 1. Ebene
- 3. Ebene: ...
- Empfänger ist Blatt des Baumes
- Äste vom Sender zum Empfänger beschreiben dominante Pfade

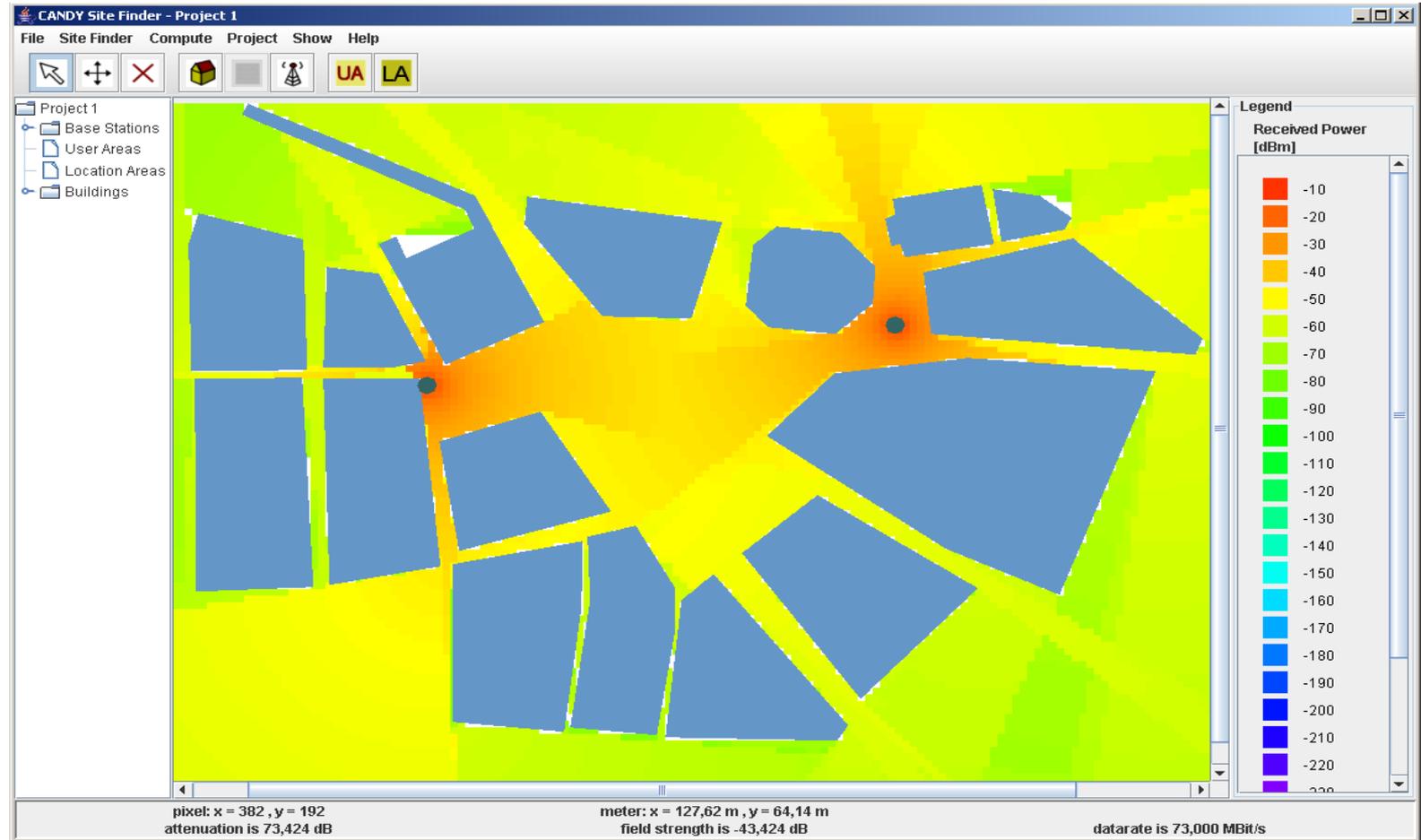
Berechnung der Dämpfungen entlang der Pfade des „Corner Tree“

- Berücksichtigung von (max.) 3 Pfaden mit geringster Dämpfung

DPP indoor - Aufbau des "Corner Tree"



DPP outdoor - Berechnung der Empfangsstärken



Modellauswahl

Modelle ausreichend genau

nur für bestimmte Frequenz- und Entfernungsbereiche

Modell	Eigenschaften
Urban Pico (AWE RL)	Entfernung: 100 m Frequenz: 600 MHz – 60 GHz
Urban Micro (AWE RT)	Entfernung: 2 km Frequenz: 300 MHz – 3 GHz
Walfish Ikegami	Entfernung: 5 km Frequenz: 0,8 – 2 GHz
Okumura Hata	Entfernung: 20 km Frequenz: < 1 GHz
Parabolic Equation Method (AWE)	Entfernung: 2000 km Frequenz: 300 KHz – 30 GHz