

Fakultät Informatik

Institut Systemarchitektur

Professur Rechnernetze

2016 LV Netzwerkpraxis / Neue Technologien

4. Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

Dr. rer.nat. D. Gütter

Mail:Dietbert.Guetter@tu-dresden.deWWW:http://www.guetter-web.de/education/npnt.htm

24.02.2016

Erzeugung elektromagnetischer Wellen

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

Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit

c _{Vakuum} = 299 792. 458 km/s (ca. 300000 km/s)

Zusammenhang

 $c = \lambda * f$ λ : Wellenlänge, f: 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.)





isotroper Kugelstrahler



Freiraumdämpfung für Leistungsdichte

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

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

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)



große Sendeentfernungen → Erdkrümmung berücksichtigen !



Ausbreitung in der Athmosphäre



Elektromagnetische Wellen [3]

Wellenlänge	Band		Eigenschaften, wellenlängenabhängig	
100 10 km	VLF	very low frequency	mit	
10 1 km	LF	low frequency	kürzerer Wellenlänge (höherer Frequenz)	
1000 100 m	MF	medium frequency	steigende Bedeutung der Raum- gegenüber	
100 10 m	HF	high frequency	der Bodenwelle	
10 1 m	VHF	very high frequency]	
100 10 cm	UHF	ultra high frequency	ab UHF Ausbreitung strahlenförmig,	
10 1 cm	SHF	super high frequency	• Schatten bei Hindernissen in der Größenordnung der Wellenlänge und kleiner (im EHF sogar Regen, Nebel,)	
10 1 mm	EHF	extremely high frequency	Überhorizontverbindung durch Beugung, Streuung und Reflexion	
1000 780 μm Infrarotstrahlung → immer lichtähnlichere Eigenschaften		Infrarotstrahlung e Eigenschaften	• Störungen durch Resonanzen mit Molekülen (Wasserdampf,)	

Effekte bei Funkausbreitung



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

Genauigkeit

- Exakte Berechnungen auf Basis der Maxwellschen 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

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)

 \circ 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^o verteilte sog. Zentralstrahlen, die jeweils ein Bündel von Einzelstrahlen repräsentieren und eine Strahlenröhre mit einem Öffnungswinkel 360^o/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

Richtantennnen strahlen die Energie ungleichmäßig ab



- Richtfaktor = Sendeleistung im Verhältnis zum Kugelstrahler
- Gewinn [dBi] = 10 * lg (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.

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

z.B.

 $\lambda/2$ -Dipol mit Gewinn = 2,15 dBi Begrenzung EIRP = 20 dBm (100 mW) → max. Sendeleistung = 17,85 dBm

- 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

Leistungsbilanz auf dem Weg vom Sender zum Empfänger



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

Addition der Logarithmen der Verluste/Gewinne Maßeinheit: dB

Pfadverlust (path loss)

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

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	(Vakuum)
	+ athmosphärische Dämpfung	(Wasser, Sauerstoff, …)
	+ Polarisationsdämpfung	(Polarisationsebenenänderung)
	+ Ausrichtungsdämpfung	(evtl. falsche Antennenausrichtung)
	- Antennengewinn	
	+	(Hindernisse)

Praktische Berechnung des Pfadverlustes im Freiraum

L/dB = 32,44 + 20 lg (f/MHz) + 20 lg (R/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 H₂0

ITU-R Modell für Dämpfung in Luft

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



Frequency (GHz)

Dämpfung durch Regen

Alain Delrieu: Meeting for World Radiocommunication Conference 2007, Bangkok



f/GHz

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 Funkzellen5 dB für Abschattungen

 \rightarrow Reserve einplanen, ca.

20 dB + Fade Margin

Beispiel für Berechnung des Pfadverlustes bei

Luftausbreitung, starker RegenFrequenz6 GHzReichweite5 km

Pfadverlust durch Freiraumdämpfung

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

+ Pfadverlust durch atmosphärische Dämpfung und starken Regen

25,1 dB = 5km*0,02dB/km + 5km*5dB/km

+ 20 dB Sicherheitsreserve

$\rightarrow L \approx 167 dB$



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

$$\frac{P_{TX}}{P_{RX}} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \times \left|\begin{array}{cc} 1 - e^{-jk(\lambda)\Delta r(d)} \end{array}\right|^{-2} \qquad \qquad \text{mit} \\ k = 2\pi/\lambda \\ \Delta r = 2^*h_b *h_m/d \end{array}$$

bei f=900 MHz, $h_m = 1,5m$, $h_b = 30m$ genäherter Pfadverlust [dB] - 50 - 100 - 100 - 150 - 150 Linterferenzbereich - 150 Linterferenzbereich - 150 Linterferenzbereich - 150

10²

10¹

10³

104

[m]

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

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

für h_m , $h_b << d$ gilt $cos(..) \approx 1$ $sin(...) \approx (...)$

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

$L = 10 \, \log(P_{TX}/P_{TR})$

unabhängig von Wellenlänge !!!

Pfadverlust

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

Plane Earth Modell - Praxistauglichkeit

Faustregel:Verdopplung der Antennenhöhe
Verdoppelung der Entfernung \rightarrow 6 dB Gewinn
12 dB VerlustMessungen:Energiedichte fällt ab mit p ~ 1/d×
bei plane earth Modell(mit x= 2 ... 5)
x = 4in Stadtgebieten geringer,
z.Bx = 3,2 \rightarrow L = 32lg(d/m) + ...

Grund: Bodenbeschaffenheit reduktiert Einfluß reflektierter Welle

Plane Earth Modell nach Egli mit Korrektur für Frequenzeinfluß

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

\rightarrow Beurteilung der Relevanz der Modelle ist sehr schwierig

Einteilung in Sendeversorgungsgebiete

Interferenzen bei Mehrwegeausbreitung und beim Senden mehrerer Stationen auf gleicher Frequenz

\rightarrow

- 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 Dachhöh	
Kleinzelle	Häuseransammlung 0,5 3km	mittlere Gebäudehöhe
Makrozelle	Häuseransammlung 1 30 km	über höchstem Gebäude
	global	Weltraum

empirisches Modell zur Berechnung des Pfadverlustes in Makrozellen



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]



Formelanpassung je nach Bereichstyp

urban area	$L_{dB} = A + B^* \log_{10} d - E$
suburban area	$L_{dB} = A + B*log_{10} d - C$
open area	$L_{dB} = A + B*log_{10} d - D$

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

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

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

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

$$E = 3,2 * (\log_{10} (11,7554 h_m))^2 - 4,97$$

= 8,29 * $(\log_{10} (1,54 h_m))^2 - 1,1$
= (1,1 log₁₀ f-0,7)*h_m - (1,56 log₁₀ f-0,8)

für große Städte, f >= 300MHz für große Städte, f < 300MHz für mittlere bis kleine Städte 1999 Erweiterung des Okumura-Hata Modells für mittlere bis kleine Städte für Frequenzbereich 1500 ... 2000 Mhz

$$L_{dB} = F + B^* log_{10} d - E + G$$

mit

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

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

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



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



Ikegami Modell [2]

W	Straßenbreite [m]
h_m	Höhe Empfängerantenne [m]
h _{Base}	Höhe Sendeantenne [m]
f	Sendefrequenz [MHz]
φ	Horizontaler Einfallwinkel

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

\rightarrow empirische Ergänzungen erforderlich

COST 231-Walfisch-Ikegami Modell [1]

semiempirisches Modell zur Berechnung des Pfadverlustes in Kleinzellen

2 Teilmodelle



COST 231-Walfisch-Ikegami Modell [2]

Pfadverlust für NLOS





NLOS (non line of sight)

 $L_{NLOS} = L_{FS} + L_{rts} (\mathsf{w}, f, h_{Roof}, h_m, \Phi) + L_{MSD} (h_{Roof}, h_{Base}, d, f, b)$ roof-to-street multi diffraction free space loss loss loss $\frac{L_{FS}}{dB} = 32,44 + 20 \lg \left(\frac{d}{km}\right) + 20 \lg \left(\frac{f}{MH_7}\right)$ $\frac{L_{rts}}{dB} = -16,9 + 10 \lg \left(\frac{f}{MHz}\right) + 20 \lg \left(\frac{h_{Roof} - h_m}{m}\right) - 10 \lg \left(\frac{w}{m}\right) + L_{ori}$ street orientation function / -10 + 0,35 Φ $0 \le \Phi \le 35^{\circ}$

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

COST 231-Walfisch-Ikegami Modell [4]

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

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \lg (1 + h_{Base} - h_{Roof}) & h_{Base} > h_{Roof} & \frac{h \text{ in } [m]}{f \text{ in } [MHz]} \\ 0 & h_{Base} <= h_{Roof} & \frac{h \text{ in } [m]}{f \text{ in } [MHz]} \\ \end{pmatrix}$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & h_{Base} - h_{Roof} & \frac{h_{Base} > h_{Roof}}{f \text{ 54 - 0.8 } (h_{Base} - h_{Roof})} & d >= 0.5 \text{ km}, h_{Base} <= h_{Roof} & \frac{h \text{ 54 - 1.6* } d^* (h_{Base} - h_{Roof})}{f \text{ 54 - 1.6* } d^* (h_{Base} - h_{Roof})} & d < 0.5 \text{ km}, h_{Base} <= h_{Roof} & \frac{h_{Base} > h_{Roof}}{f \text{ 33 - 15 } h_{Base} / h_{Roof}} & h_{Base} > h_{Roof} & \frac{h_{Base} > h_{Roof}}{h_{Base} - h_{Roof}} & \frac{h_{Base} > h_{Roof}}{h_{Base} - h_{Roof}} & \frac{h_{Base} > h_{Roof}}{f \text{ 33 - 15 } h_{Base} / h_{Roof}} & \frac{h_{Base} > h_{Roof}}{h_{Base} <= h_{Roof}} & \frac{h_{Base} - h_{Roof}}{f \text{ 33 - 15 } h_{Base} / h_{Roof}} & \frac{h_{Base} <= h_{Roof}}{h_{Base} <= h_{Roof}} & \frac{h_{Base} - h_{Roof}}{f \text{ 33 - 15 } h_{Base} / h_{Roof}} & \frac{h_{Base} <= h_{Roof}}{h_{Base} <= h_{Roof}} & \frac{h_{Base} - h_{Roof}}{f \text{ 33 - 15 } h_{Base} / h_{Roof}} & \frac{h_{Base} - h_{Roof}}{h_{Base} <= h_{Roof}} & \frac{h_{Base} - h_{Roof}}{f \text{ 15 } (f / 925 - 1)} & \frac{h_{Base} - h_{Roof}}{f \text{ medium sized city}} & \frac{h_{Roof} - h_{Roof}}{f \text{ 15 } (f / 925 - 1)} & \frac{h_{Roof} - h_{Roof}}{f \text{ medium sized city}} & \frac{h_{Roof} - h_{Roof}}{f \text{ 15 } (f / 925 - 1)} & \frac{h_{Roof} - h_{Roof}}{f \text{ medium sized city}} & \frac{h_{Roof} - h_{Roof}}{f \text{ 15 } (f / 925 - 1)} & \frac{h_{Roof} - h_{Roof}}{f \text{ medium sized city}} & \frac{h_{Roof} - h_{Roof}}{f \text{ 15 } (f / 925 - 1)} & \frac{h_{Roof} - h_{Roof}}{f \text{ medium sized city}} & \frac{h_{Roof} - h_{Roof}}{f \text{ 15 } (f / 925 - 1)} & \frac{h_{Roof} - h_{Roof}}{f \text{ medium sized city}} & \frac{h_{Roof} - h_{Roof}}{f \text{ 15 } (f / 925 - 1)} & \frac{h_{Roof} - h_{Roof}}{f \text{ 15 } (f / 925 - 1)} & \frac{h_{Roof} - h_{Roof}}{f \text{ 15 } (f / 925 - 1)} & \frac{h_{Roof} - h_{Roof}}{f \text{ 15 } (f / 925 - 1)} & \frac{h_{Roof} - h_{Roof}}{f \text{ 15 } (f / 925 - 1)} & \frac{h_{Roof} - h_{Roof}}{f \text{ 15 } (f / 925 - 1)} & \frac{h_$$

empirisches Modell zur Berechnung des Pfadverlustes in Mikrozellen

Einfaches Pfadverlustmodell

mit 2 Steigungen n_1 bzw. n_2 und einem Umkehrpunkt d_b

$$L = \begin{cases} 10n_{1} \lg d + L_{1} & d <= d_{b} \\ 10n_{2} \lg (d/d_{b}) + 10n_{1} \lg d_{b} + L_{1} & d > d_{b} \end{cases}$$

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 = 1m,z.B. 20 dB d_b meist ca. 100 m $n_1 = 2$ und $n_2 = 4$ oft große empirische Abweichungen

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

Modell ähnelt "plane earth Modell", aber ungleich lange Strahlenwege



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 = 1m

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)

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

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

Frequency	Environment		
[GHz]	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.

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

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

^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.

semiempirisches Modell zur Berechnung des Pfadverlustes in Gebäuden (Pikozellen)

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





$$L_1 = n_w L_i$$
 $L_2 = \alpha (r_i - 2)(1 - \cos \theta)^2$

Gütter/Rechnernetzpraxis

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	5 GHz
	Dämpfung [dB]	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

 \rightarrow dominante Strahlen



Ergebnisse bei geringerem Rechenaufwand vergleichbar mit anderen strahlenoptischen Modellen

dominante Strahlenbilden 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



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 (ANE DT)	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	Entfernung: 2000 km	
(AWE)	Frequenz: 300 KHz – 30 GHz	