

Erläuterungen zur Ermittlung der Grundlagen für die Berechnung von Schattendiagrammen im Kanton Thurgau

Projektteam

Andreas Friederich

Ralph Straumann

Le-Wan Tran

Ernst Basler + Partner AG

Mühlebachstrasse 11

8032 Zürich

Telefon +41 44 395 16 16

info@ebp.ch

www.ebp.ch

Inhaltsverzeichnis

1	Tabelle der Berechnungsgrundlagen.....	1
2	Ermittlung der Berechnungsgrundlagen.....	2
2.1	Grundlagen.....	3
2.2	Qualitätsvergleich von JPL HORIZONS und VSOP87.....	4
2.3	Sensitivitätstests	5
2.4	Berechnungsmethodik	7

Anhang

A1	Literatur	
----	-----------	--

1 Tabelle der Berechnungsgrundlagen

Lokalzeit	UTC-Zeit	$\alpha = \text{Azimut} + 180^\circ$ [°]	$\beta = \text{Altitude}$ [°]	$\cot(\beta)$
08:00	07:00	62.13	4.8420	11.8050
09:00	08:00	50.13	13.1066	4.2950
10:00	09:00	36.84	20.0339	2.7424
11:00	10:00	22.09	24.9961	2.1449
12:00	11:00	6.16	27.4606	1.9242
13:00	12:00	10.14	27.1103	1.9533
14:00	13:00	25.83	23.9927	2.2468
15:00	14:00	40.23	18.4953	2.9895
16:00	15:00	53.18	11.1765	5.0613
17:00	16:00	64.91	2.7531	20.7957

Tabelle 1: Tabelle mit den Werten der Tagesstunden der mittleren Wintertage (9. Februar und 2. November) für die 2-h-Schattenberechnung.

Lokalzeit	UTC-Zeit	$\alpha = \text{Azimut} + 180^\circ$ [°]	$\beta = \text{Altitude}$ [°]	$\cot(\beta)$
07:00	05:00	104.51	6.8287	8.3507
08:00	06:00	93.74	16.7343	3.3259
09:00	07:00	82.51	26.8132	1.9785
10:00	08:00	69.91	36.6196	1.3455
11:00	09:00	54.70	45.5724	0.9802
12:00	10:00	35.31	52.7427	0.7606
13:00	11:00	11.01	56.7496	0.6556
14:00	12:00	15.46	56.3531	0.6656
15:00	13:00	38.99	51.6966	0.7898
16:00	14:00	57.56	44.1344	1.0307
17:00	15:00	72.21	34.9822	1.4291
18:00	16:00	84.49	25.0944	2.1353
19:00	17:00	95.59	15.0141	3.7284
20:00	18:00	106.36	5.1921	11.0051

Tabelle 2: Tabelle mit den Werten der Tagesstunden der mittleren Sommertage (30. April und 13. August) für die 3-h-Schattenberechnung.

2 Ermittlung der Berechnungsgrundlagen

Im Internet existieren diverse Werkzeuge und Webseiten zur Berechnung der Positionswinkel verschiedener astronomischer Objekte. Diese Werkzeuge basieren auf Ephemeriden (vorberechnete Tabellen mit Positionen astronomischer Objekte zu bestimmten Zeitpunkten) oder astronomischen Berechnungen dieser Ephemeriden.

Nicht alle online verfügbaren Werkzeuge basieren auf wissenschaftlich geprüften, empfehlenswerten Berechnungsgrundlagen. Darüber hinaus ist die Verwendung der komplizierten Werkzeuge nicht ganz einfach zu bewerkstelligen.

Aus diesen Gründen wurde die Ermittlung der Sonnenwinkel für das Kantonale Hochbauamt Thurgau auf eine verlässliche, allgemein anerkannte und geprüfte Grundlage gestellt. Diese Grundlage wurde ausserdem anhand eines Quervergleichs mit einer zweiten Grundlage geprüft. Schliesslich wurde die Sensitivität der Sonnenwinkelberechnung auf verschiedene Einflussfaktoren geprüft, um das optimale Vorgehen für die Berechnungsgrundlagen zu ermitteln.

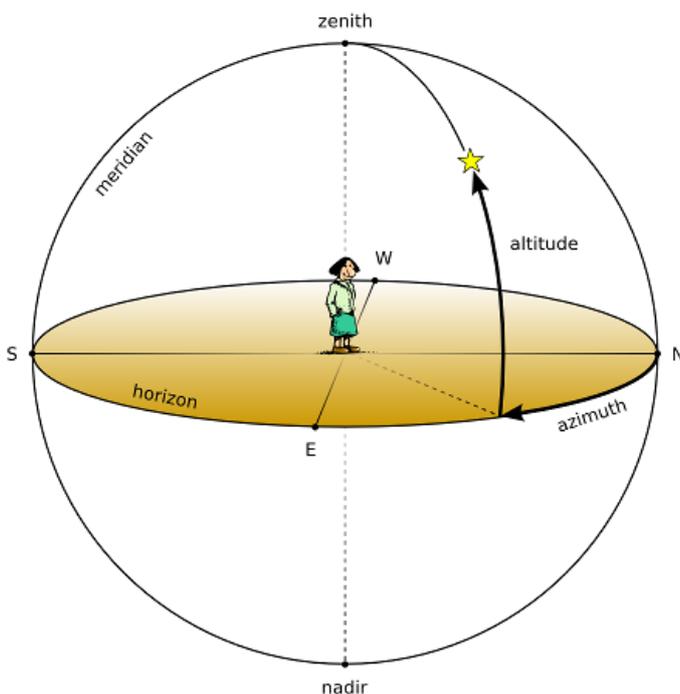


Abbildung 1: Astronomisches Bezugssystem mit Azimut und Altitude (Quelle: Stellarium 2014).

Für das Verständnis der folgenden Ausführungen sind die in Abbildung 1 gezeigten Begriffe Azimut (englisch „azimuth“) und Altitude wichtig. Azimut bezeichnet die Abweichung von der Nord-Richtung. Die Altitude ist auch bekannt als Sonnenhöhe oder Höhenwinkel.

2.1 Grundlagen

2.1.1 Datengrundlagen

Für die Berechnung der Sonnenwinkel wurden die in Tabelle 3 aufgeführten Datengrundlagen verwendet.

Name	Beschreibung	Quelle
JPL HORIZONS	Ephemeriden-Berechnung <i>Solar System Dynamics Group</i> des <i>Jet Propulsion Laboratory (JPL)</i> der NASA für über 650'000 astronomische Objekte	JPL (2014)
PyEphem	Python-Bibliothek zur Ephemeriden-Berechnung, basierend auf Programmteilen der Astronomie-Software <i>XEphem</i>	PyEphem (2014)

Tabelle 3: *Datengrundlagen für die Berechnung der Sonnenwinkel*

Die ausgewählten Datengrundlagen repräsentieren die zwei astronomischen Standards für das Nachschlagen bzw. die Berechnung von Ephemeriden: JPL und VSOP87¹ (VSOP87 ist Grundlagen von PyEphem).

Für die Ableitung der Berechnungsgrundlagen des Schattenwurfs selbst wird JPL HORIZONS verwendet, da dieses mit der NASA aus einer autoritativeren Quelle stammt als PyEphem. Für die später ausgeführten Sensitivitätstests wurde PyEphem verwendet, da dieses direkt mit Python-Skripten aufgerufen werden kann, um verschiedene Szenarien zu berechnen. So kann der Aufwand für die Sensitivitätstests gering gehalten werden. In einem ersten Schritt wird die sehr hohe Übereinstimmung der beiden Berechnungsarten anhand eines Quervergleichs bestätigt.

2.1.2 Rahmenbedingungen

Die Bestimmungen des Kantons Thurgau zum Schattenwurf von Hochhäusern stützen sich auf sogenannte „mittlere Sommertage“ und „mittlere Wintertage“ (vgl. PBV §38, Stand 05.11.2016 bzw. Kapitel 1 in der „Wegleitung zur Berechnung von Schattendiagrammen“ Stand 30.01.2017).

In seinen Ausführungen zum entsprechenden Paragraphen nennt das Departement für Bau und Umwelt des Kantons Thurgau die in Tabelle 4 aufgeführten Stichtage für die Berechnung des Schattenwurfs (und damit von Sonnenwinkeln). Im Folgenden basieren alle Berechnungen auf diesen Stichtagen.

Stichtage Sommer

Stichtage Winter

¹ VSOP87 (Variations Séculaires des Orbites Planétaires) ist eine von Bretagnon und Francou (1988) entwickelte bogensekunden-genaue Methode zur Berechnung der Positionen von Objekten im Sonnensystem.

30. Mai und 22. August

2. November und 8. Februar

Tabelle 4: Mittlere Sommer- bzw. Wintertage

Für die Berechnung von Sonnenwinkeln ist neben der Zeit auch die räumliche Lage entscheidend. Mittels einer GIS-gestützten Analyse wird hierfür der Schwerpunkt (Zentroid) des Kantons Thurgau ermittelt (Abbildung 2). Dabei wird der Seeanteil am Kantonsgebiet ignoriert, da dieser für den Bau von Häusern nicht relevant ist. Mit diesem Vorgehen kommt der Schwerpunkt des Kantons Thurgau bei den Landeskoordinaten 721769 / 269406 in der Nähe von Weinfelden zu liegen.

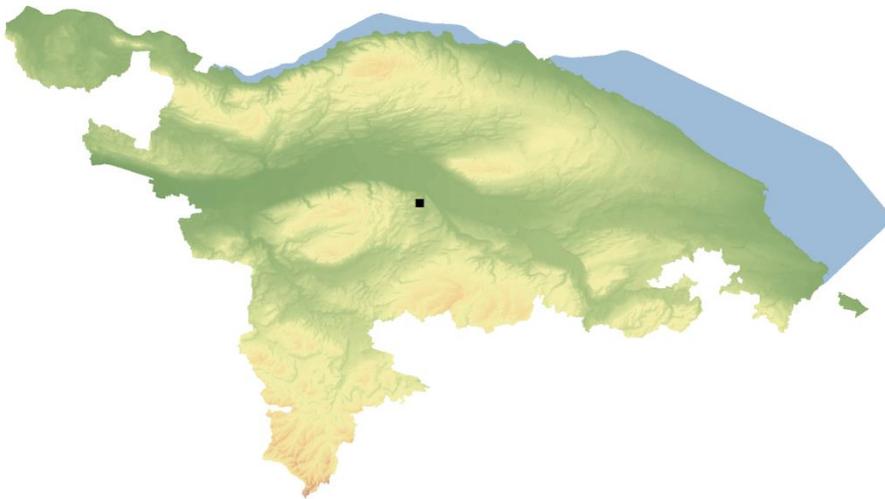


Abbildung 2: Schwerpunkt des Kantons Thurgau (ohne Berücksichtigung des Bodensees)

2.2 Qualitätsvergleich von JPL HORIZONS und VSOP87

Zum Vergleich der Resultate von JPL HORIZONS und VSOP87 wird einerseits das Web-Interface des JPL (<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>) benutzt und andererseits ein Python-Skript programmiert, welches die auf VSOP87 basierenden Sonnenwinkel mit PyEphem berechnet. Bei Benutzung von JPL HORIZONS ist es wichtig darauf zu achten, dass die Berechnung durch die Atmosphäre und andere Faktoren („Reisezeit“ des Lichts, Gravitationseffekte, etc.) mitberücksichtigt sind².

² Die relevante Grösse wird unter „Table Settings“ → „Quantities“ gesetzt: „Apparent AZ & EL“ (Option 4), vgl. Dokumentation unter http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons_doc#specific_quantities.

Der Vergleich der beiden Berechnungsmethoden anhand des Schwerpunkts des Kantonsgebiets ergibt während der Tagesstunden (Altitude > 0 Grad, d.h. Sonne über dem künstlichen Horizont) die Resultate in Tabelle 5.

Kennwert	Absolute Abweichung des Azimuts [°]	Absolute Abweichung der Altitude [°]
Minimum	0.00111	0.00003
Mittelwert	0.00164	0.00269
Maximum	0.00369	0.01304

Tabelle 5: Absolute Abweichungen des Azimuts und der Altitude zwischen PyEphem und JPL HORIZONS zu Tagesstunden, berechnet für vier Stichtage und im Schwerpunkt des Kantons Thurgau.

Mit den äusserst geringen Werten in Tabelle 5 ist klar, dass die Abweichungen zwischen den Modellen JPL HORIZONS und VSOP87 angesichts der Anwendung sicherlich vernachlässigbar sind. Aus diesem Grund ist die effizientere Verwendung von PyEphem für die folgenden Sensitivitätstests zulässig.

2.3 Sensitivitätstests

Die Berechnung der Sonnenwinkel wird im Folgenden drei Sensitivitätstests unterzogen:

- Erstens wird untersucht, wie stark sich die Sonnenwinkel für unterschiedliche Orte im Kanton Thurgau verändern.
- Zweitens wird abgeklärt, wie stark der Einfluss der Höhe über Meer ist.
- Drittens analysieren wir, wie sich die Sonnenwinkel über einen langen Zeitraum infolge Variation in den astronomischen Konstellationen verändern.

2.3.1 Lage

Für die Untersuchung des Einflusses der räumlichen Lage wurde zu jeder der vier Himmelsrichtungen ein Extrempunkt im Kanton Thurgau gewählt (Abbildung 3). Da der nördlichste Teil des Kantons gleichzeitig der westlichste ist, wurde der nördliche Extrempunkt nach Ermatingen verschoben. Dieser Punkt liegt weit nördlich und in Ost-West-Richtung ungefähr in der Mitte des Kantons.

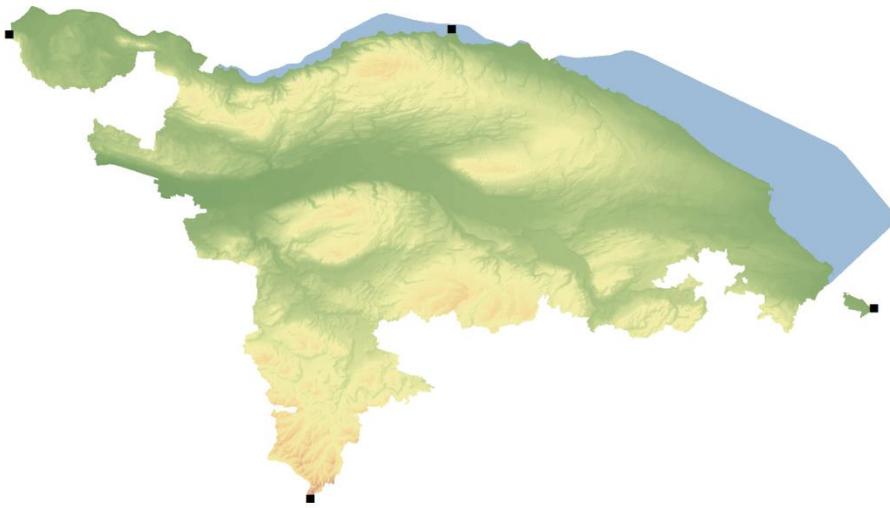


Abbildung 3: Vier Extrempunkte des Kantons Thurgau zur Überprüfung des Lageinflusses.

Für die Bewertung der Lagesensitivität wurde dann wie folgt vorgegangen:

1. Berechnung der Sonnenwinkel zu den Tagesstunden der Stichtage für die vier Extrempunkte.
2. Berechnung der mittleren Sonnenwinkel pro Stunde aus den jeweils vier Werten aus 1.
3. Berechnung der mittleren absoluten Abweichung der Sonnenwinkel aus 1. und aus 2.
4. Berechnung der mittleren Abweichungen als Durchschnitt der Werte aus 3.

Diese Berechnungsschritte ergeben die mittleren Abweichungen von Azimut und Altitude in Tabelle 6. Diese betragen weniger als ein Viertelgrad.

Mittlere Azimut-Abweichung [°]	Mittlere Altitude-Abweichung [°]
0.243279	0.144472

Tabelle 6: Mittlere absolute Abweichung des Azimuts und der Altitude zwischen den vier Extrempunkten des Kantons Thurgau und den gemittelten Werten.

Um die Anwendung der Wegleitung zur Berechnung des Schattenwurfs für Hochhäuser im Kanton Thurgau möglichst einfach zu gestalten, empfehlen wir die Verwendung des Schwerpunkts des Kantons Thurgau als Referenzpunkt für die Sonnenwinkel-Berechnung³.

³ Der Sinus der in Tabelle 6 ermittelten Azimut-Abweichung beträgt 0.004246. Wird ein 100 Meter langer Schatten angenommen, der ohne Abweichung direkt nach Norden zeigt, ergibt sich ein seitlicher Versatz von 0.42 Meter, wenn die Abweichung miteinberechnet wird. Dies ist der *Worst Case*. Für Azimutwinkel zwischen 10° und 350° ergeben sich Versätze von 0–0.42 Meter bzw. 0–2.41%. Bei der Altitude ergeben sich für Winkel von 10° bis 80° Abweichungen der Schattenlänge von -1.45–1.5%.

2.3.2 Höhe

Die Spannweite der Höhe über Meer im Gebiet des Kantons Thurgau reicht von 370 Meter in Neunforn bis 991 Meter auf dem Hohgrat. Für die Untersuchung des Einflusses der Höhe auf die Sonnenwinkel wurden deshalb Höhen von 400 Meter, 500 Meter, 600 Meter, 700 Meter, 800 Meter, 900 Meter und 1'000 Meter gewählt. Für die Lage wurde der Schwerpunkt des Kantons verwendet.

Die Abweichungen zwischen diesen Varianten werden analog zum Vorgehen in Kapitel 2.3.1 ermittelt und liegen in der Grössenordnung von 10^{-14} Grad (Azimut) und 10^{-8} Grad (Altitude). Der Einfluss der Höhe auf die Sonnenwinkel ist somit vernachlässigbar.

2.3.3 Zeit

Für die Analyse der Sensitivität über die Zeit wurden die Jahre 2015, 2020, 2025 und 2030 verwendet. Die Abweichungen zwischen diesen Varianten werden analog zum Vorgehen in Kapitel 2.3.1 ermittelt. Es ergeben sich die Abweichungen in Tabelle 7; diese sind aufgrund ihrer geringen Grösse vernachlässigbar.

Mittlere Azimut-Abweichung [°]	Mittlere Altitude-Abweichung [°]
0.038745	0.058351

Tabelle 7: *Mittlere absolute Abweichung des Azimuts und der Altitude zwischen den vier Jahren und den gemittelten Werten.*

2.4 Berechnungsmethodik

Die etablierten Sonnenwinkel-Berechnungsmethoden für die Beurteilung von Gebäudeschatten stützen sich auf Stichtage ab, um das Winter- bzw. Sommerhalbjahr zu repräsentieren. Wie in Kapitel 2.1.2 erwähnt, nennt das Departement für Bau und Umwelt des Kantons Thurgau in seinen Ausführungen zum §38 PBV (Stand 05.11.2016, vgl. auch Kapitel Kapitel 1 in der „Wegleitung zur Berechnung von Schattendiagrammen“ Stand 30.01.2017) die Stichtage in Tabelle 4 auf Seite 4.

Allerdings finden sich in der Literatur unterschiedliche Angaben zum im Gesetz erwähnten (aber nicht näher definierten) „mittleren Sommer-“ bzw. „Wintertag“. Beispielsweise nennt Paul Märki (2005) in Unterlagen zu einem Gastreferat an der Hochschule Rapperswil den 8. Februar, 3. November, 1. Mai und 12. August als mittlere Tage. Mittlere Tage sind hier als solche definiert, an denen die Deklination der Sonne +/-15° beträgt. Die Datumsangaben und Grundlagen fussen gemäss Auskunft von Herrn Märki auf einer Publikation des ehemali-

gen Amts für Regionalplanung des Kantons Zürich aus dem Jahr 1967 (Amt für Regionalplanung: 1967).

In seiner Masterarbeit am Institut für Banking und Finance der Universität Zürich nennt Matthias Künzler gestützt auf dieselbe Publikation ebenfalls den 3. November und 8. Februar als mittlere Wintertage und den 1. Mai und 12. August als mittlere Sommertage (Künzler 2011).

Diese Publikationen scheinen nahezulegen, dass die Stichtage im Sommerhalbjahr in den Ausführungen des Departements für Bau und Umwelt des Kantons Thurgau (30. Mai und 22. August) falsch sind.

Aus diesem Grund haben wir die Wahl der Stichtage anhand der Methode der „mittleren Deklination“ überprüft. Zu diesem Zweck haben wir die Deklination der Sonne um 12 Uhr UTC an jedem Tag des Jahres von JPL (2014) bezogen.

Für das Sommerhalbjahr (21. März–23. September) und das Winterhalbjahr (1. Januar–20. März und 24. September–31. Dezember) wurden dann die Werte der Deklination der Sonne gemittelt (diese variiert über das Jahr zwischen $+23.44^\circ$ und -23.44°) (Tabelle 8).

Halbjahr	Mittelwert Deklination	Medien Deklination
Winterhalbjahr	-14.7458°	-16.2491°
Sommerhalbjahr	$+14.8036^\circ$	$+16.4625^\circ$

Tabelle 8: Mittelwerte der Deklination im Winter- und Sommerhalbjahr

Anschliessend wurden gemäss dem üblichen Vorgehen jene Tage ermittelt, an denen die Deklination der Sonne den mittleren Werten der Deklination am nächsten kommt. Diese Daten sind in Tabelle 9 aufgeführt.

Stichtag	Deklination
9. Februar	-14.7531°
30. April	$+14.6929^\circ$
13. August	$+14.7416^\circ$
2. November	-14.6646°

Tabelle 9: Mittlere Winter- (blau hinterlegt) und Sommertage (orange hinterlegt)

Anhand dieser Berechnungen wurde auch ersichtlich, dass sich die Abweichungen von einem Tag, die bisweilen in der Literatur zu beobachten sind, daher herrühren, dass manche Analysen wie jene von Märki (2005) mit einer mittleren Deklination von $\pm 15^\circ$ statt mit den in Tabelle 8 angegeben exakten Werten rechnen.

Für die Erstellung der Tabellen der Sonnenwinkel in Kapitel 1 wurden folglich die in Tabelle 9 aufgeführten mittleren Sommer- bzw. Wintertage verwendet. Als Berechnungsort wurde wie in Kapitel 2.1.2 ausgeführt 721769 / 269406 bzw. 47.56407° Nord und 9.05678° Ost mit einer Höhe von 400 Meter angenommen. Die Sonnenwinkel der jeweils zwei Tage pro Halbjahr wurden für die Tabelle 1 und die Tabelle 2 jeweils stundenweise gemittelt.

A1 Literatur

Amt für Regionalplanung (1967): Anleitung zur Bestimmung des Schattenverlaufes von hohen Gebäuden : Die 2-Stunden-Schattenkurve, <http://www.worldcat.org/title/anleitung-zur-bestimmung-des-schattenverlaufes-von-hohen-gebauten-die-2-stunden-schattenkurve/oclc/82714804>.

Bretagnon P und G. Francou (1988): Planetary theories in rectangular and spherical variables. VSOP87 solutions. Astronomy and Astrophysics. 202, 309–315, http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-jarticle_query?1988A%26A..202..309B.

JPL (2014): Solar System Dynamics: JPL HORIZONS. <http://ssd.jpl.nasa.gov/?planets>.

Künzler M (2011): Hochhäuser in Zürich und der Schattenwurf – Eine rechtliche Würdigung. Masterthesis, Universität Zürich, http://www.bf.uzh.ch/curemaplications/masterthesen/2011/Kuenzler_Matthias_MT_2011.pdf.

PyEphem (2014): Compute positions of the planets and stars: ephemeris 3.7.5.3. <https://pypi.python.org/pypi/ephem>.

Stellarium (2014): Astronomical concepts. http://www.stellarium.org/wiki/index.php/Astronomical_Concepts.

Märki P (2005): Anleitung zur Konstruktion des Dauerschattens von Gebäuden, <http://www.maplan.ch/dauerschatten>.