

Handbuch zur Kritikalität

Band 2

Zusammenstellung der
Kritikalitätskenngrößen

Teil 1

Daten für ²³⁵Uran

Handbuch zur Kritikalität

Band 2

Zusammenstellung der Kritikalitätskenngrößen

Teil 1

Daten für ²³⁵Uran

Juni 2019

überarbeitete Auflage

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) unter dem Kennzeichen 4716E03350 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Vorbemerkung

Die vorliegende Fassung wurde gegenüber der Ausgabe vom Dezember 1998 überarbeitet, ergänzt und modernisiert. Die Überarbeitung der zugrundeliegenden Ausgabe lag bei Robert Kilger, Franz-Eberhard Moser und Fabian Sommer. Robert Kilger und Fabian Sommer übernahmen die inhaltlich-redaktionellen Anpassungen.

Das Handbuch besteht aus zwei Bänden. Band 1 erläutert die Grundlagen der Kritikalitätsproblematik und Terminologie. Band 2 beinhaltet die systematische Zusammenstellung der Kritikalitätskenngrößen. Band 2 ist in zwei Teilbände unterteilt: Teil 1 (vormals Band II) enthält die Daten für Stoffsysteme mit dem Spaltstoff 235U, Teil 2 (vormals Band III) behandelt die Daten für Stoffsysteme mit den Spaltstoffen 233U, Plutonium und höhere Aktinoide.

Haftungsausschluss

Das BMU, die GRS gGmbH und die in deren Namen handelnden Personen übernehmen

- keine Gewähr, dass die in diesem Dokument enthaltenen Informationen richtig und vollständig sind,
- keine Gewähr, dass die Verwendung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen, der in diesem Dokument beschriebenen wissenschaftlich-technischen Methoden und Verfahren oder administrativen Anordnungen nicht gegen gewerbliche Schutzrechte verstößt,
- keine Haftung für Schäden, die infolge der Verwendung der in diesem Dokument beschriebenen Anforderungen, Methoden oder Verfahren entstehen können.

Deskriptoren

Kritikalität, Kritikalitätskenngrößen, kritische Parameter, nukleare Sicherheit, Spaltstoff

Vorwort

Das vorliegende Handbuch wurde vornehmlich mit dem Ziel erstellt, den in Behörden oder Forschungseinrichtungen tätigen und mit Kritikalitätsfragen befassten Personen Informationen in die Hand zu geben, die schon bei der Planung und der Erstellung von Anlagen der Kerntechnik eine zutreffende und rasche Beurteilung von Kritikalitätsfragen erlauben. Es liegt jedoch nicht in der Absicht der Verfasser des Handbuchs, fertige Lösungen für komplexe Probleme der nuklearen Sicherheit anzubieten. Derartige Fragen werden stets einer eingehenden Analyse und Berechnung durch Kritikalitätsfachleute vorbehalten bleiben müssen.

Gegenüber der bisherigen Ausgabe vom Dezember 1998 wurde das vorliegende Handbuch weiter überarbeitet und ergänzt. Die bewährte Grundstruktur des Handbuchs bleibt unverändert. Das Handbuch folgt dabei in mancherlei Hinsicht ähnlichen Kritikalitätshandbüchern oder Anleitungen, die in den USA, in Großbritannien, Frankreich, Japan und in der ehemaligen Sowjetunion erschienen sind.

Der sinnvolle Gebrauch der im Handbuch vorliegenden Informationen erfordert ein grundsätzliches Verständnis der Kritikalitätsproblematik und der Terminologie der nuklearen Sicherheit. In Band 1, „Kritikalität und nukleare Sicherheit“, werden daher zunächst die wichtigsten Begriffe und Grundlagen eingeführt und erläutert. Daran anschließend werden experimentelle Methoden und Rechenverfahren zur Berechnung von Kritikalitätsproblemen dargestellt. Die folgenden Kapitel von Band 1 behandeln u. a. die Wirkung von Neutronenreflektoren und -absorbern, die Neutronenwechselwirkung, Messverfahren zur Kritikalitätskontrolle, organisatorische Sicherheitsmaßnahmen und geben einen Überblick über kritikalitätsrelevante Betriebserfahrungen sowie über Kritikalitätsunfälle und ihre potentiell gefährdenden Auswirkungen.

Der Band 2 (Teil 1 und 2) enthält Kritikalitätskenngrößen in Kurven- und Tabellenform. Die einzelnen Kurvenblätter sind jeweils mit einem eingangs aufgeschlüsselten Kennungssystem versehen, um ein rasches Auffinden der gerade interessierenden Information zu ermöglichen. Band 2, Teil 1 (vormals Band II) enthält Kritikalitätskenngrößen für Stoffsysteme mit ^{235}U als Spaltstoff, während Band 2, Teil 2 (vormals Band III) Stoffsysteme mit den Spaltstoffen ^{233}U und Plutonium sowie mit höheren Aktinoiden behandelt.

Preface

This handbook was prepared primarily with the aim to provide information to experts of authorities or research facilities engaged in criticality-safety-related problems that will allow an adequate and rapid assessment of criticality safety issues already in the planning and preparation of nuclear facilities. However, it is not the intention of the authors of the handbook to offer ready solutions to complex problems of nuclear safety. Such questions have to remain subject to an in-depth analysis and assessment to be carried out by dedicated criticality safety experts.

Compared to the previous edition dated December 1998, this handbook has been further revised and supplemented. The proven basic structure of the handbook remains unchanged. The handbook follows in some ways similar criticality handbooks or instructions published in the USA, UK, France, Japan and the former Soviet Union.

The expedient use of the information given in this handbook requires a fundamental understanding of criticality and the terminology of nuclear safety. Therefore, in Vol. 1, "Criticality and Nuclear Safety", first the most important terms and fundamentals are introduced and explained. Subsequently, experimental techniques and calculation methods for evaluating criticality problems are presented. The following chapters of Vol. 1 deal i. a. with the effect of neutron reflectors and absorbers, neutron interaction, measuring methods for criticality, and organisational safety measures and provide an overview of criticality-relevant operational experience and of criticality accidents and their potential hazardous impact.

Vol. 2 (part 1 and 2) finally compile criticality parameters in graphical and tabular form. The individual graph sheets are provided with an initially explained set of identifiers, to allow the quick finding of the information of current interest. Vol. 2, part 1 (former Vol. II) includes criticality parameters for systems with ^{235}U as fissile material, while Vol. 2, part 2 (former Vol. III) deals with systems comprising ^{233}U , plutonium and higher actinides.

Inhaltsverzeichnis

	Homogene Wasser-Systeme	1
1.A	Homogene $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Wasser-Systeme	1
1.B	Homogene Urandioxid-Wasser-Systeme	11
1.C	Homogene Uranoxifluorid-Wasser-Systeme	63
1.F	Homogene Uranylinitrat-Wasser-Systeme	81
1.G	Homogene AUC-Wasser-Systeme	93
1.H	Homogene ADU-Wasser-Systeme	105
1.I	Homogene Uran(VI)oxid-Wasser-Systeme	117
	Diverse Wasser-Systeme	129
2.B	Heterogene Urandioxid-Wasser-Systeme	129
3.B	Homogene Urandioxid-Thoriumdioxid-Wasser- und -Isopropanol-Systeme	133
	Homogene Graphit-Systeme	139
5.A	Homogene $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Graphit-Systeme	139
5.B	Homogene Urandioxid-Graphit-Systeme	147
7.B	Homogene Urandioxid-Thoriumdioxid-Graphit-Systeme	153
9.B	Homogene Urandioxid-Thoriumdioxid-Systeme mit Graphit-Wasser- Moderation	167
	Literaturverzeichnis	174
	Abbildungsverzeichnis	183
	Tabellenverzeichnis	193

Erläuterung zum Inhaltsverzeichnis von Band 2

Die Daten und Kurvenblätter für die Kritikalitätsparameter in Band 2 des Handbuchs (Teil 1 und 2) sind nach Spaltstoffsystem, Spaltstoffverbindung und Art des Kritikalitätsparameters geordnet. Die Kurvenunter- und Tabellenüberschriften weisen dementsprechend eine aus drei Kenngrößen bestehende Bezeichnung auf. Aus abbildungstechnischen Gründen ist es teilweise nötig, die Darstellung eines Kritikalitätsparameters auf mehrere Blätter zu verteilen. Die Blätter werden in diesem Fall mit einem zusätzlichen, fortlaufenden Buchstaben identifiziert. Der Spaltstoff in der jeweiligen chemischen Verbindung wird zusätzlich durch eine Abkürzung in den Kurvenblättern rechts oben gezeigt.

Erläuterung der Kenngrößen

Die erste Kenngröße bezeichnet das Spaltstoff-Moderator-System. Als zweite Kenngröße wird ein Buchstabe zur Charakterisierung der Art der chemischen Verbindung des Spaltmaterials verwendet. Die dritte Kenngröße bezeichnet die Art des dargestellten Kritikalitätsparameters, z. B. Masse oder Volumen. Kurvenblätter zum gleichen Kritikalitätsparameter für Spaltstoffe mit unterschiedlicher Isotopenzusammensetzung verwenden als dritte Kenngröße eine zweistellige Zahl; hier steht die erste Ziffer für die laufende Nummerierung des Spaltstoffs, während die zweite Ziffer die Art des Kritikalitätsparameters kennzeichnet. Bei einigen Spaltstoffsystemen kommt eine vierte Kenngröße zum Einsatz, die verschiedene Unterscheidungsgrößen charakterisiert. Zum einen werden durch sie historische (Abb. #.#.#.a) und neuere (Abb. #.#.#.b) Berechnungen der gleichen Größen unterschieden (Kapitel 1.B, 1.C). Zum anderen weisen sie Rechenmodell-Aufrisse den jeweiligen Kurvenblättern zu (Kapitel 10.F), zeigen Datenblätter mit unterschiedlichen Neutronengiften (Kapitel 1.B, 5.B, 15.B), Geometrien (Kapitel 1.B, 10.F), verschiedenen Reflektoren (Kapitel 1.B), verschiedene Füllfaktoren (Kapitel 9.B) oder verschiedenen Restfeuchten (Kapitel 1.B).

Bei den Tabellen wird ein Buchstabe als dritte Kennung zur fortlaufenden Nummerierung verwendet. Den Tabellen und Kurvenblättern für ein Spaltstoffsystem ist jeweils ein kurzer Begleittext mit näheren Erläuterungen vorangestellt. Literaturangaben sind immer am Ende des Abschnitts für das Spaltstoffsystem angegeben. Die meisten Daten und Kurvenblätter gelten für Systeme mit voller Reflexion durch Wasser (30 cm H₂O). Bei anderen Reflektoren sind Material, Dichte und Dicke des Reflektors explizit angegeben.

Erste Kenngröße	Spaltstoffsystem
1	^{235}U - ^{238}U -Wasser, homogen
2	^{235}U - ^{238}U -Wasser, heterogen
3	^{235}U -Thorium-Wasser, homogen
4	^{235}U -Thorium-Wasser, heterogen
5	^{235}U - ^{238}U -Graphit, homogen
6	^{235}U - ^{238}U -Graphit, heterogen
7	^{235}U -Thorium-Graphit, homogen
8	^{235}U -Thorium-Graphit, heterogen
9	^{235}U mit gemischter Graphit-Wasser-Moderation, homogen
10	Plutonium-Wasser, homogen
11	Uran-Plutonium-Wasser, homogen
12	Uran-Plutonium-Wasser, heterogen
13	Uran-Plutonium-Graphit, homogen
14	Uran-Plutonium-Graphit, heterogen
15	^{233}U -Thorium-Wasser, homogen
16	^{233}U -Thorium-Wasser, heterogen
17	^{233}U -Thorium- D_2O , heterogen
18	^{233}U -Graphit, homogen
19	Sonstige Mischsysteme
20	Höhere Aktinoiden

Zweite Kenngröße	Spaltstoff-Verbindung
A	Metallischer Spaltstoff
B	Oxid (UO_2 , PuO_2)
C	Oxifluorid (UO_2F_2)
D	Karbid (UC , PuC)
E	Oxalat (z. B. $\text{Pu}(\text{C}_2\text{O}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
F	Nitrat (z. B. $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
G	Ammoniumuranylkarbonat (AUC), APuC, AUPuC
H	Ammoniumdiuranat (ADU)
I	Uran(VI)oxid (UO_3)
K	Plutonylnitrat ($\text{PuO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

Dritte Kenngröße Kritikalitätsparameter

1	kritische Kugelmasse als Funktion der Spaltstoffkonzentration
2	kritisches Kugelvolumen als Funktion der Spaltstoffkonzentration
3	kritischer Zylinderdurchmesser (Höhe infinit) als Funktion der Spaltstoffkonzentration
4	kritische Schichtdicke (Ausdehnung infinit) als Funktion der Spaltstoffkonzentration
5	Moderationsverhältnis als Funktion der Spaltstoffkonzentration
6	infiniter Multiplikationsfaktor als Funktion der Spaltstoffkonzentration
7	kleinste kritische Konzentration als Funktion der Anreicherung
8	maximaler infiniten Multiplikationsfaktor als Funktion der Anreicherung
höhere Werte	Parameter für Spezialfälle

Vierte Kenngröße u.U. zusätzliche Unterscheidung

a,b,c,...	Unterscheidung historische/neue Rechnungen Rechenmodell-Aufriss zum Kurvenblatt verschiedene Neutronengifte verschiedene Geometrien verschiedene Reflektoren verschiedene Restfeuchten
-----------	---

Homogene Wasser-Systeme

1.A Homogene $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Wasser-Systeme

Die folgenden Tabellen und Kurvenblätter enthalten Kritikalitätsparameter für homogene ^{235}U - und ^{238}U -Wasser-Systeme verschiedener ^{235}U -Anreicherungen (10, 50 und 100 Gew%). Diese ist jeweils als Parameter für die entsprechende Kurve angegeben. Sämtliche Kritikalitätsdaten gelten für voll wasserreflektierte Systeme. Die theoretische Dichte des Uranmetalls beträgt $18,9\text{ g/cm}^3$.

Die historischen Daten basieren auf 16-Gruppen-Rechnungen mit den Programmen GAMTEC /CAR 65/, GAM-II /JOA 63/, DTF-IV /LAT 65/, KENO-II /WHI 69/ und der unten aufgeführten Literatur /UKA 65/, /ANS 61/, /PAX 64/, /LEC 65/, /LEC 65/, /JAR 66/, /ROA 67/, /CLA 66/, /CAR 68/ und /GRA 70/. Die Resonanzbehandlung von ^{238}U erfolgte nach der Methode von Nordheim. Ein Teil der Rechnungen wurde unter Verwendung der 16-Gruppen-Wirkungsquerschnitte von Hansen und Roach /HAN 61/ durchgeführt.

Grundlegende Kritikalitätsparameter sind in Tabellenform zusammengefasst. Aus den Kritikalitätsdaten können durch Anwendung der in Band 1 angegebenen Sicherheitsfaktoren sichere Werte (größter zulässiger Wert) für Massen, Volumina und geometrische Dimensionen gewonnen werden.

Die kleinsten kritischen Werte wurden zudem im direkten Vergleich unter Berücksichtigung der neueren Veröffentlichungen /PAX 87/, /PRU 96/, /SHO 95/ und /ANN 96/ überprüft. Bei inhomogener Spaltstoffverteilung nimmt die kleinste kritische Kugelmasse etwa um 3 bis 5 % ab. Für ^{235}U -H₂O erbrachten 16-Gruppen-Rechnungen mit den Codes GAMTEC und DTF eine kleinste kritische Kugelmasse von $772\text{ g }^{235}\text{U}$ bei voller Wasserreflexion. Ähnliche Werte und prozentuale Massenabnahmen durch inhomogene Spaltstoffverteilung finden sich bei Mills /LEC 65/ und H. K. Clark /CLA 66/.

Tab. 1.A.A Grundlegende Kritikalitätsdaten für homogene ²³⁵U-Wasser-Systeme unter voller Wasserreflexion (Daten aus den 1970ern)

Kritikalitätsparameter	Kleinster kritischer Wert	Größter zulässiger Wert ¹
Masse [kg Uran]		
Lösung ($\leq 1 \text{ gU/cm}^3$)	0,80	0,35
Metall	21,8	10,0
Volumen [Liter]		
Lösung ($\leq 1 \text{ gU/cm}^3$)	5,5	4,6
Durchmesser eines infiniten Zylinders [cm]		
Lösung ($\leq 1 \text{ gU/cm}^3$)	14,0	12,6
Metall	7,6	6,8
Dicke einer infiniten Schicht [cm]		
Lösung ($\leq 1 \text{ gU/cm}^3$)	4,4	3,8
Metall	1,5	1,25
Konzentration einer wässrigen Lösung [g ²³⁵ U/Liter]	12,1	6,0
²³⁵ U-Anteil im Gesamturan	1,0	0,9

¹ Sicherheitsfaktoren:

- Sichere Masse $\leq 45\%$ der kritischen Masse **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$
- Sicheres Volumen $\leq 80\%$ des kritischen Volumens
- Sichere Dimension $\leq 90\%$ der kritischen Dimension
- Sichere Konzentration $\leq 50\%$ der kritischen Konzentration

Tab. 1.A.B Kleinste kritische Kugelmasse für homogene ²³⁵U-Wasser-Systeme mit verschiedenen Reflektoren

% ²³⁵U	Reflektor	Kleinste kritische Kugelmasse [g U]	
100	30 cm Wasser	800	/LEC 65/
100	100 cm Graphit ¹	600	/LEC 65/
100	100 cm Schwerwasser D ₂ O ¹	480	/LEC 65/
100	50 cm Beryllium	290 ± 30	/GRA 70/
100	Natur-Uran-Wasser	135 ± 65	/MAU 78/
93,5	Ohne Reflektor	1450	/MAU 78/
93,5	2,5 cm Wasser	1180	/MAU 78/
93,5	20 cm Wasser	870	/MAU 78/
93,5	25 cm Blei und 15 cm Wasser	520	/MAU 78/
93,5	Normalbeton (volle Reflexion)	818	/MAU 78/

¹ Bei größeren Dicken noch niedrigere kleinste kritische Kugelmassen /MAU 78/.

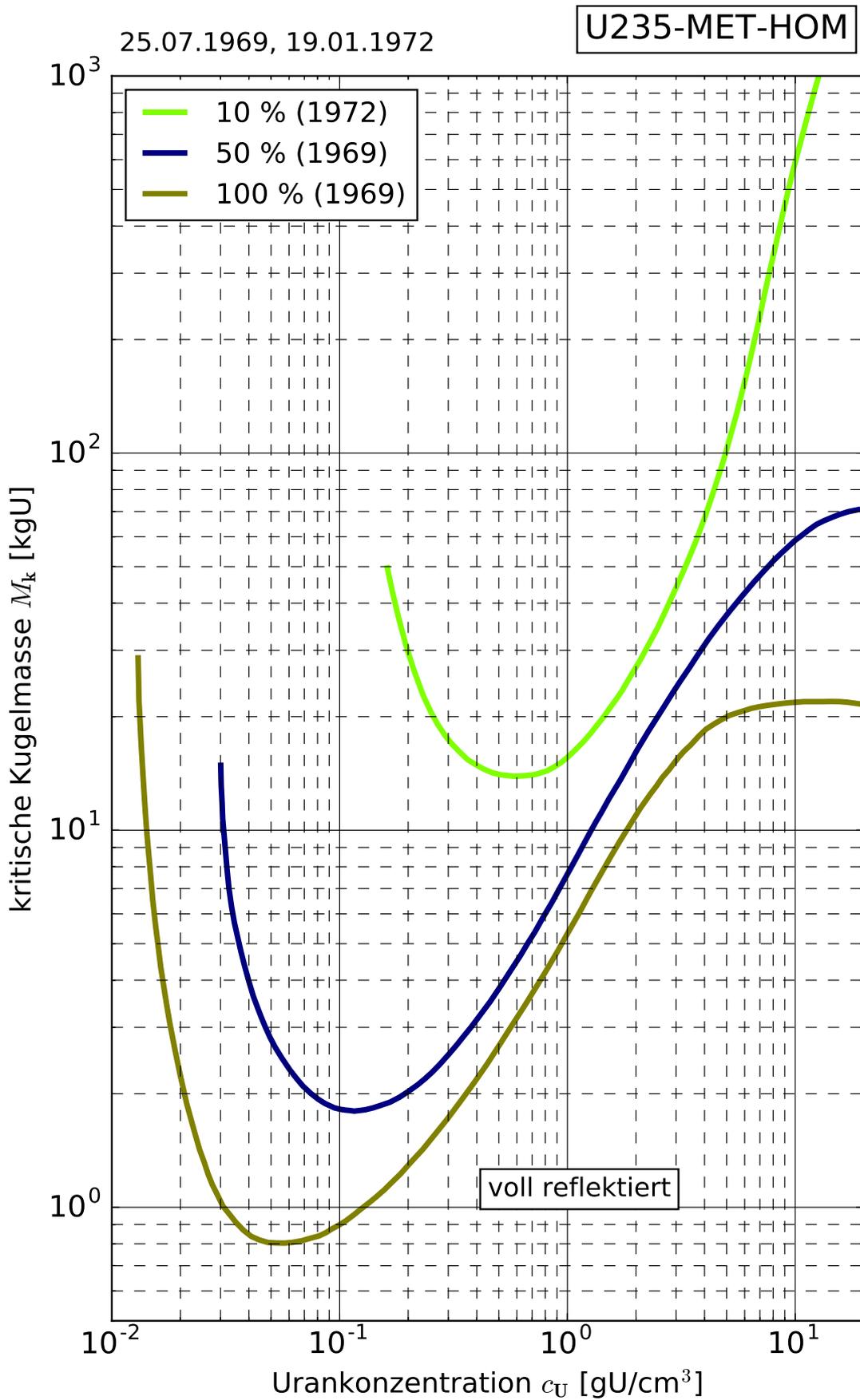


Abb. 1.A.1 Kritische Kugelmasse von homogenen Uran-Wasser-Systemen

25.07.1969, 07.07.1971

U235-MET-HOM

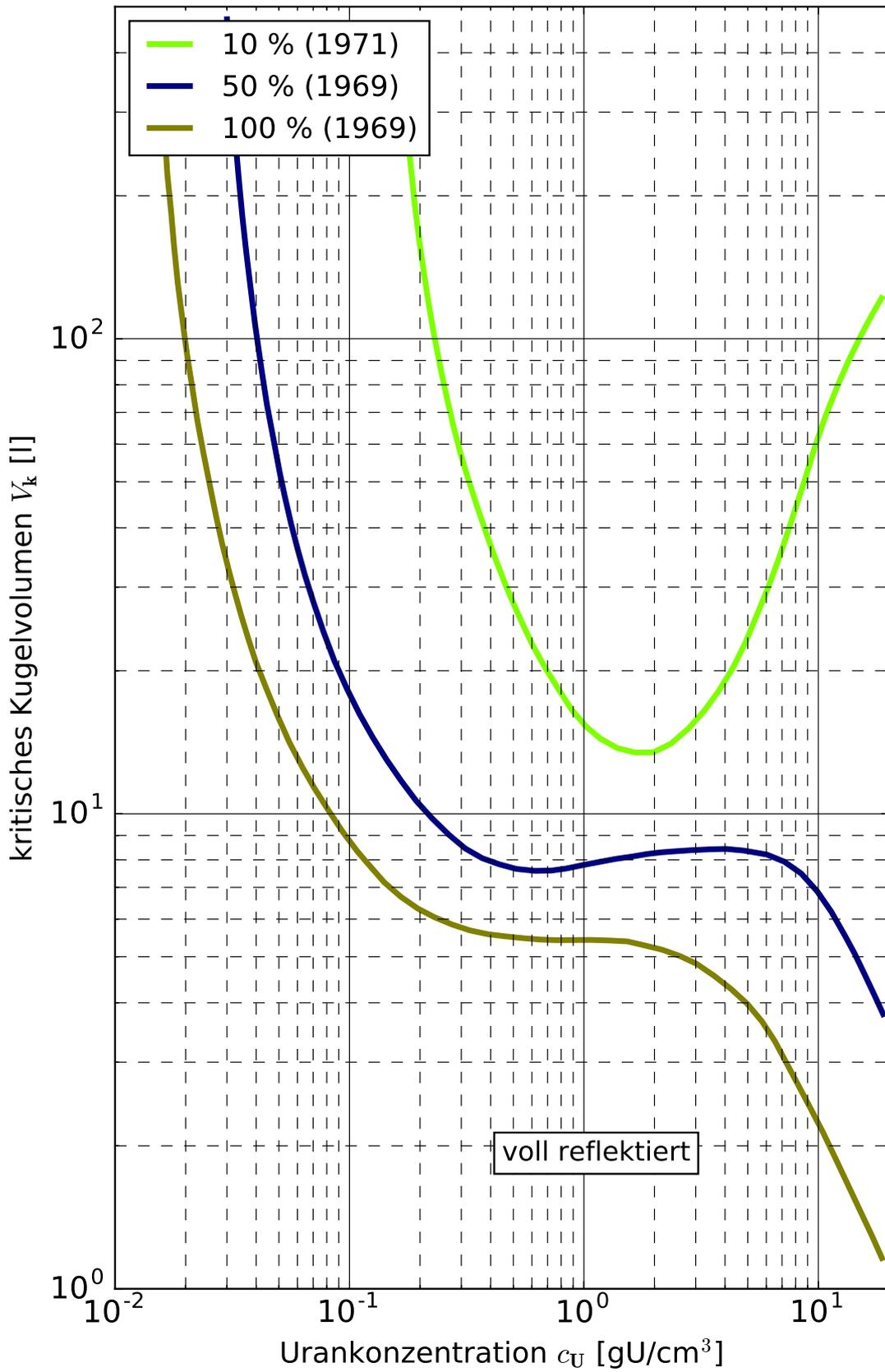


Abb. 1.A.2 Kritisches Kugelvolumen von homogenen Uran-Wasser-Systemen

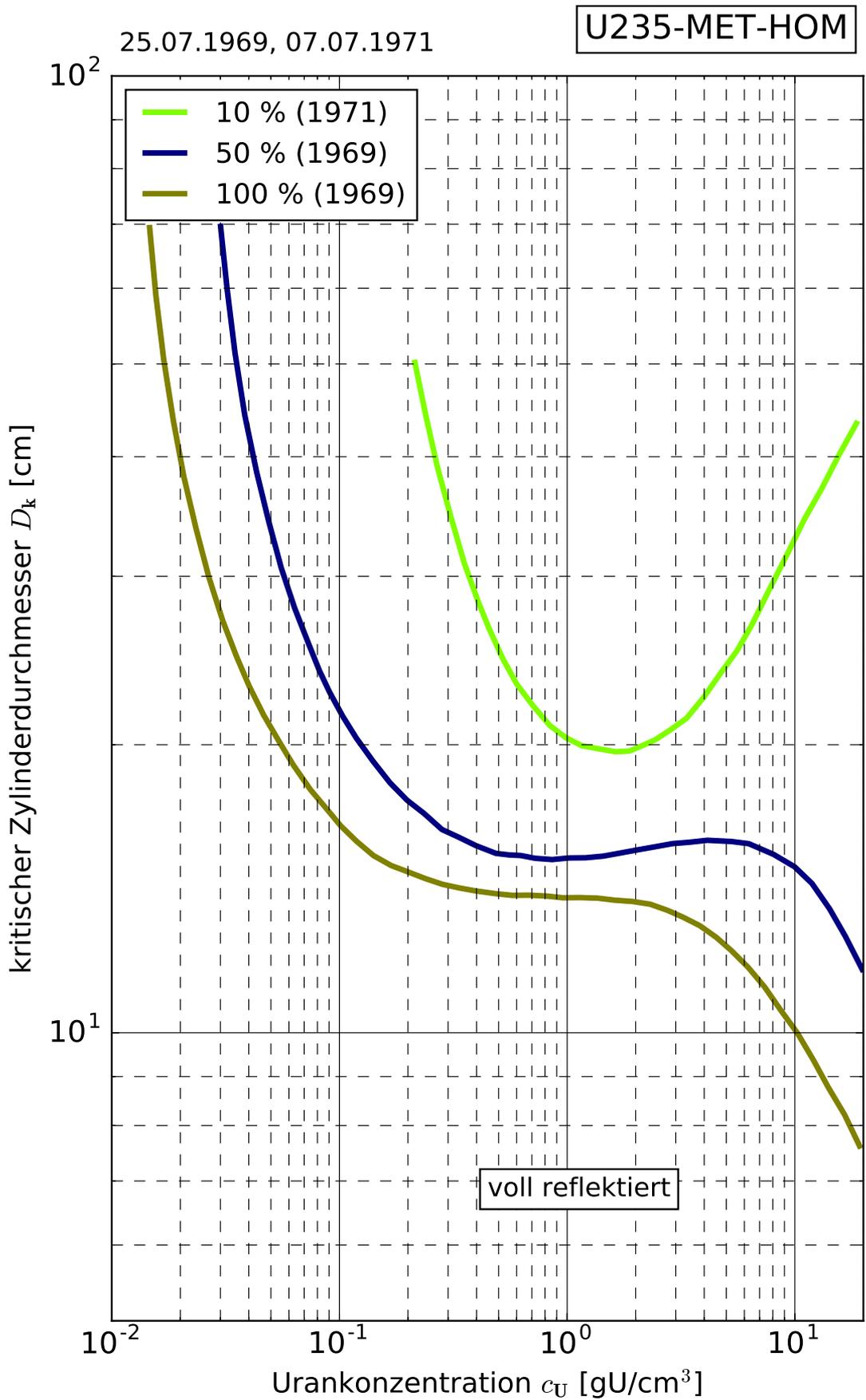


Abb. 1.A.3 Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Uran-Wasser-Systemen

25.07.1969, 07.07.1971

U235-MET-HOM

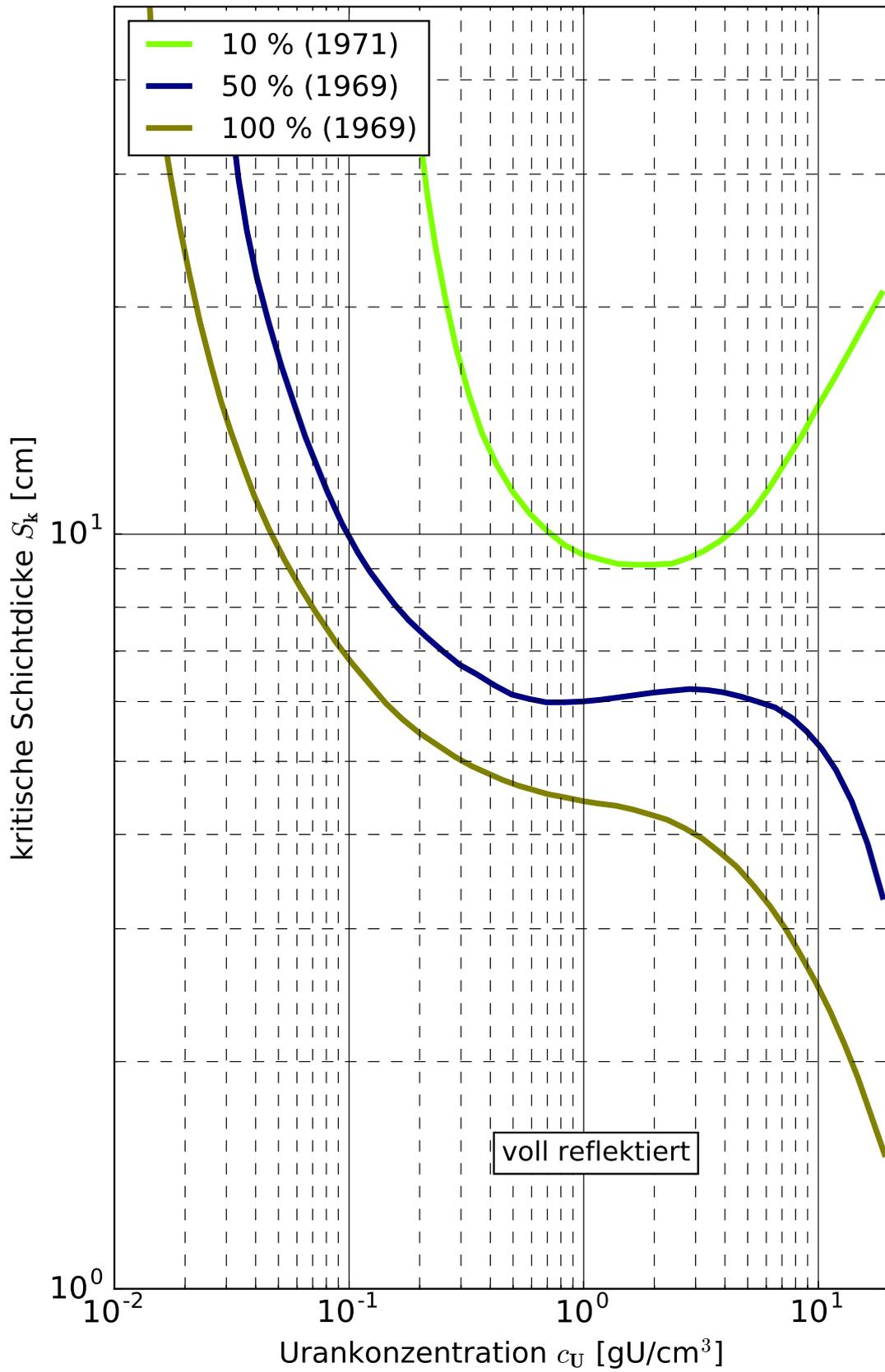


Abb. 1.A.4 Kritische Schichtdicke von homogenen Uran-Wasser-Systemen

16.10.1970

U235-MET-HOM

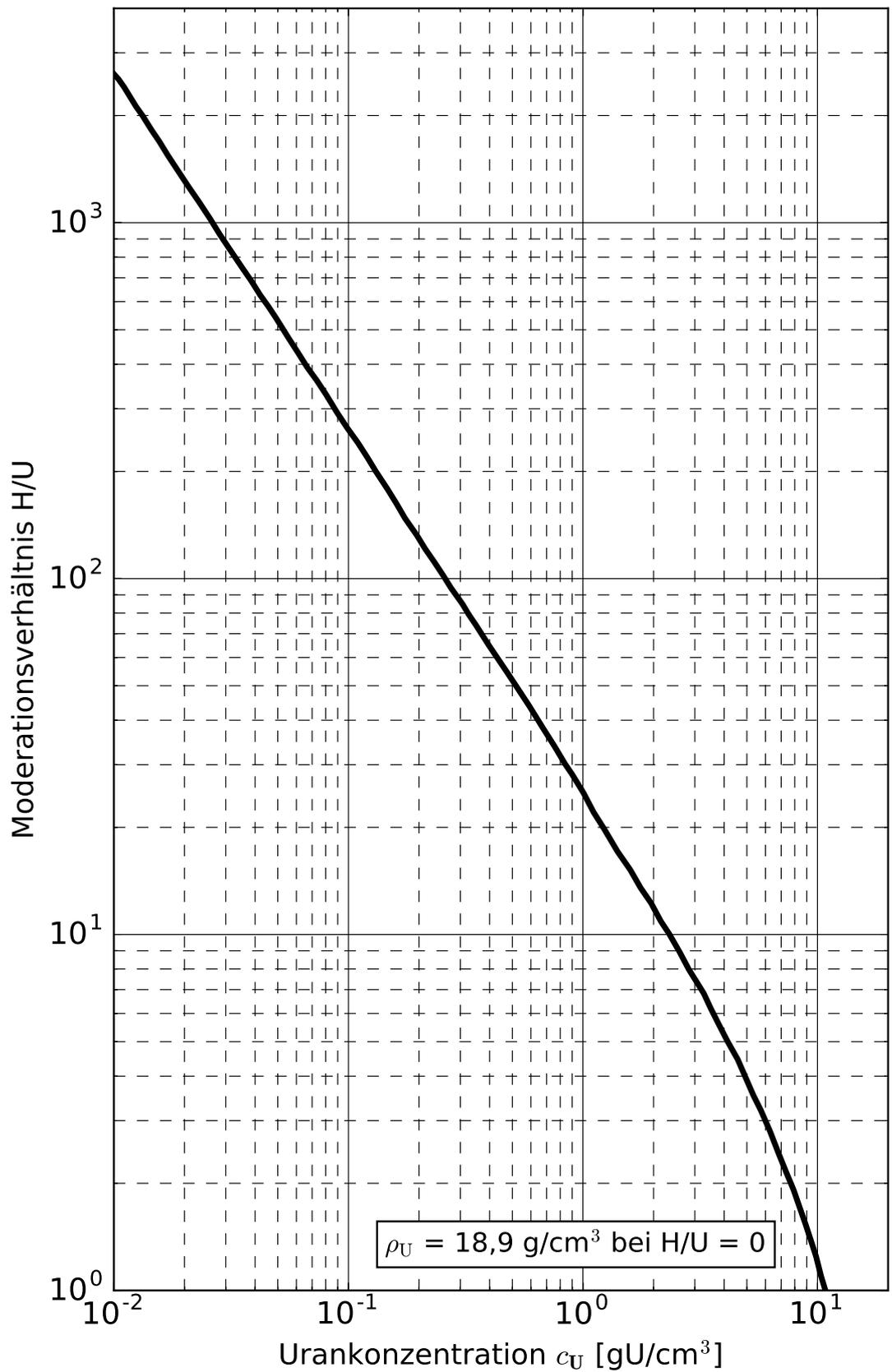


Abb. 1.A.5 Moderationsverhältnis von homogenen Uran-Wasser-Systemen

07.07.1971

U235-MET-HOM

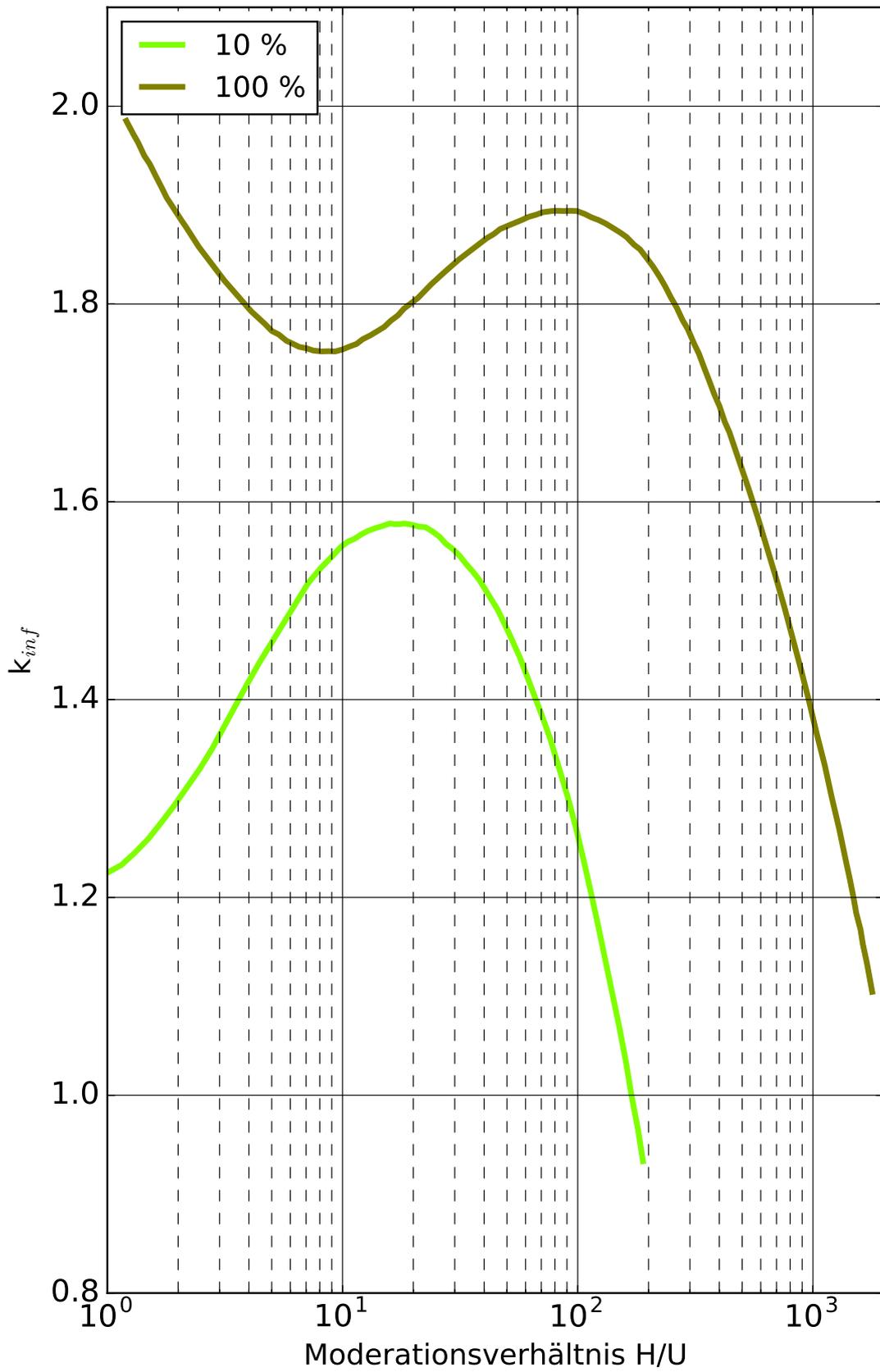


Abb. 1.A.6 Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen Uran-Wasser-Systemen

06.02.1976

U235-MET-HOM

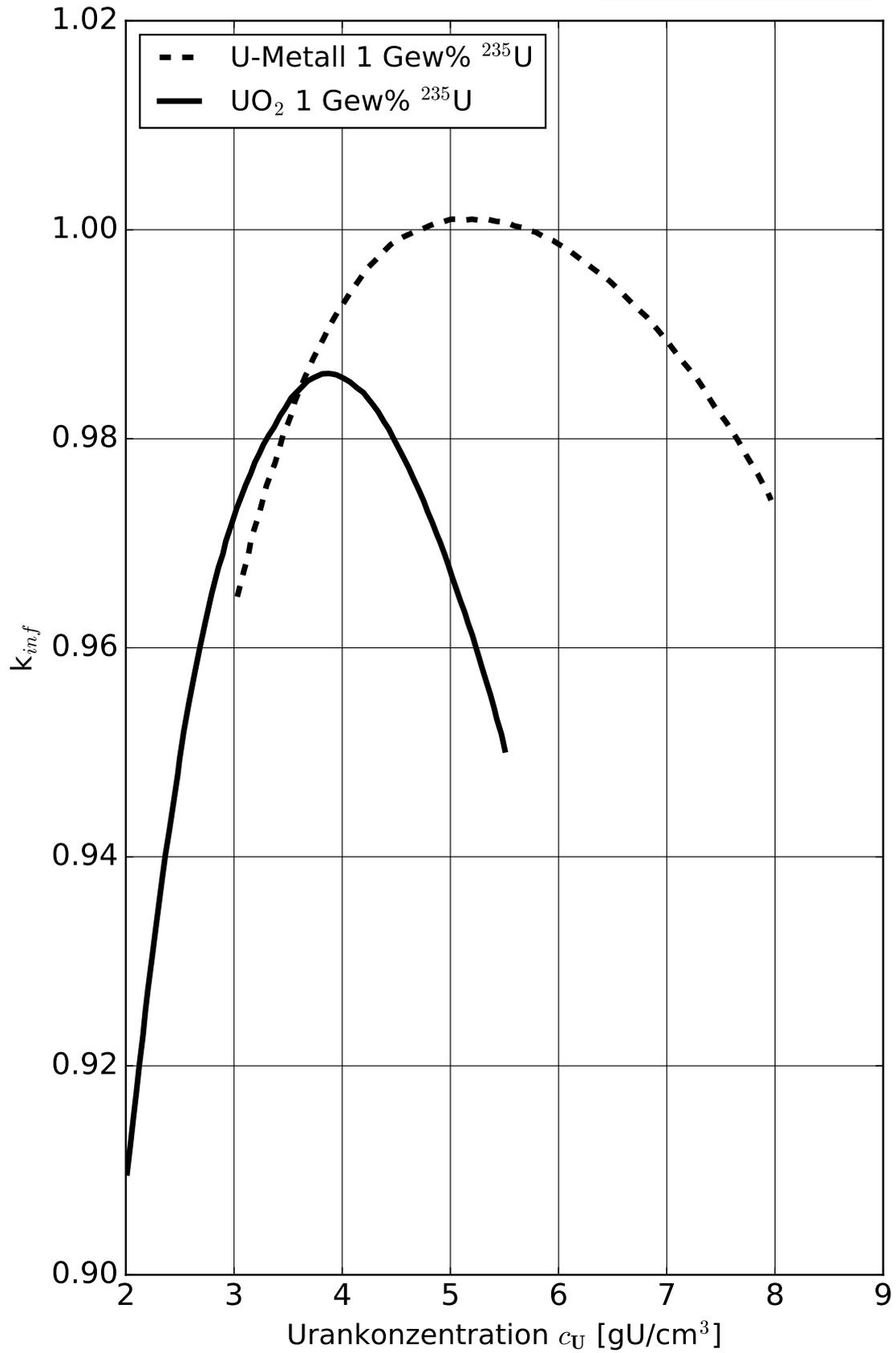


Abb. 1.A.16 Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen U-Metall- bzw. UO_2 -Wasser-Systemen

1.B Homogene Urandioxid-Wasser-Systeme

Die folgenden Tabellen und Kurvenblätter enthalten Kritikalitätsparameter für homogene Urandioxid-Wasser-Systeme verschiedener ^{235}U -Anreicherungen (2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50 und 93 Gew%). Diese ist jeweils als Parameter für die entsprechende Kurve angegeben. Sämtliche kritische Werte gelten für voll wasserreflektierte Systeme (30 cm Wasserreflektor), soweit kein anderer Reflektor angegeben ist.

Die theoretische Dichte des Urandioxid beträgt $10,96 \text{ g/cm}^3$. Verbleibende Freiräume bei den einzelnen Urankonzentrationen sind außer im Fall der stark untermoderierten Systeme verringert Dichte (Abb. 1.B.12 bis Abb. 1.B.15 und Abb. 1.B.31.a bis Abb. 1.B.34.d) vollständig mit Wasser aufgefüllt (Restwasserauffüllung); dies ist eine sinnvolle Annahme, da Urandioxid in Wasser praktisch unlöslich ist.

Es werden mehrere Datensätze wiedergegeben. Die historischen Kritikalitätsdaten aus den 70ern für ^{235}U -Anreicherungen ≥ 10 Gew% in den Abb. 1.B.1.a bis Abb. 1.B.4.a (jeweils Abb. ###.a) und in den Abb. 1.B.10 bis Abb. 1.B.15 basieren auf Rechnungen mit GAMTEC /CAR 65/ und DTF-IV /LAT 65/ (16 Energiegruppen), und auf der angegebenen Literatur /UKA 65/, /CAR 68/, /JON 66/, /STR 64/, /CLA 66/, /NEW 65/ sowie /PAX 87/, /PRU 96/, /SHO 95/ und /ANN 96/. Für die DTF-Rechnungen wurde bei Zylindergeometrie eine S_4 -Approximation benützt. Beim Vergleich der Resultate zeigt sich, dass die mit GAMTEC-DTF berechneten kritischen Dimensionen knapp unterhalb der im UKAEA-Handbook /UKA 65/ veröffentlichten Werte liegen. Die historischen Kritikalitätsdaten aus den 70ern und 80ern für niedrige ^{235}U -Anreicherungen (2 bis 5 Gew%) in den Abb. 1.B.1.a bis Abb. 1.B.4.a (jeweils Abb. ###.a) und in den Abb. 1.B.16 und Abb. 1.B.23 bis Abb. 1.B.25.c wurden mit SCALE 0 und der auf ENDF/B-IV-Daten beruhenden 27-Gruppen-Bibliothek unter Verwendung des Transportprogramms XSDRN berechnet /BUC 80/, /GRE 69/. Die ^{238}U -Resonanzabsorption wurde nach Nordheim behandelt.

Für die neueren Berechnungen von 1998 bis 2001 zu ^{235}U -Anreicherungen von 6, 7 und 8 Gew% in den Abb. 1.B.1.b bis Abb. 1.B.4.b (jeweils Abb. ###.b) kam der Code XSDRNPM (Steuersequenz CSAS1X) aus SCALE 4.3 /RSI 95/ mit der 44-Gruppen-Bibliothek (ENDF/B-V) und P_3/S_8 -Näherung zum Einsatz. Als Konvergenzkriterium für k_{eff} wurde dabei $\varepsilon = 10^{-4}$ verwendet.

Neu aufgenommen wurden weiterhin jüngere Daten (bis 2011) mit ^{235}U -Anreicherungen von

3,0 bis 6,0 Gew% in den Abb. 1.B.1.b bis Abb. 1.B.4.b (jeweils Abb. ###.b), die mit der Steuersequenz CSAS1 aus dem Programmsystem SCALE 6 /ORN 05/ und der auf ENDF/B-VII.0-Daten basierenden 238-Gruppen-Bibliothek v7-238 berechnet wurden. Diese Daten wurden durch umfangreiche Experimentnachrechnungen von der GRS validiert /KIL 09/, /KIL 13/. Mit dem Monte Carlo Code MCNP 5 Version 1.51 und ENDF/B-VII.0 Punktwirkungsquerschnittsdaten wurden zusätzliche stichprobenweise Vergleichsrechnungen durchgeführt, um die berechneten Daten weiter zu verifizieren, wobei die ermittelten Werte innerhalb der statistischen Schwankungen des Rechenverfahrens (2σ) bestätigt werden konnten.

Diese neu berechneten Werte der kleinsten kritischen Parameter liegen bis 5 Gew% ^{235}U -Anreicherung unterhalb derjenigen Werte, welche in der ursprünglichen Datensammlung enthalten waren. Da jedoch bei 5 Gew% ^{235}U sowohl der historische als auch der neue Wert innerhalb der Bandbreite von $37,0 \pm 1,0$ kg Uran der Werte liegen, welche von der OECD-NEA "Expert Group on Minimum Critical Values" (EGMCV) /OEC 06/ ermittelt wurde, sind in Tab. 1.B.A und Tab. 1.B.B jeweils beide Werte aufgeführt.

Aus den angegebenen Kritikalitätsparametern können durch Anwendung der in Band 1 aufgeführten Sicherheitsfaktoren sichere Werte für Masse, Volumen und geometrische Abmessungen abgeleitet werden. Tab. 1.B.A und Tab. 1.B.B bringen eine Zusammenfassung kleinster kritischer und sicherer Daten.

Zusätzlich wurden mit XSDRN (Steuersequenz CSAS1, SCALE 6) infinite Multiplikationsfaktoren für homogene Urandioxid-Wasser-Systeme bis 100 % ^{235}U (siehe Abb. 1.B.6.a) sowie für 5 % ^{235}U -Anreicherung mit unterschiedlichen Beimengungen von Gadoliniumoxid Gd_2O_3 der Dichte $7,41 \text{ g/cm}^3$ (siehe Abb. 1.B.6.b) neu gerechnet.

Für stark untermoderierte Urandioxid-Wasser-Systeme verminderter Dichte werden in den Abb. 1.B.12 bis Abb. 1.B.15 Kritikalitätsparameter für eine ^{235}U -Anreicherung von 93 % angegeben. Diese Daten wurden mit dem Code GAMTEC über Bucklingkonversion errechnet. Da für trockene oder leicht feuchte Urandioxid-Pulver dieser hohen ^{235}U -Anreicherung keine experimentellen Daten veröffentlicht sind, können die angegebenen Werte – auch aufgrund ihres Alters (1971) – nur als vorläufig angesehen werden. Bei der Ableitung sicherer Werte ist daher ein größerer Sicherheitsabschlag als normalerweise anzusetzen.

Dies gilt insbesondere auch für die in Abb. 1.B.16 enthaltenen historischen k_∞ -Werte für niedrig angereicherte Urandioxid-Wasser-Systeme bis 7 % ^{235}U -Anreicherung, die mit dem Pro-

grammsystem SCALE unter Verwendung von 27-Gruppen-Wirkungsquerschnitten errechnet worden sind /BUC 80/, /GRE 69/. Urandioxid mit 1 Vol.% Wasser wird bei 5 Gew% ^{235}U -Anreicherung nicht kritisch, der infinite Multiplikationsfaktor k_{∞} dieses Systems liegt etwa bei 0,98. Als kleinste kritische Anreicherungen ergeben sich bei diesem Rechenverfahren unter Angabe eines 95 %-Vertrauensintervalls:

– 0 Gew% H_2O : $7,3 \pm 0,1$ Gew% ^{235}U

– 1 Gew% H_2O : $5,6 \pm 0,2$ Gew% ^{235}U

Für untermoderierte Urandioxid-Wasser-Systeme mit 5, 6, 7 und 8 Gew% ^{235}U -Anreicherung und mit 1, 2, 3 und 5 Vol.% Wasser („Restfeuchte“) bezogen auf die Urandioxid-Dichte, werden in Abb. 1.B.31.a bis Abb. 1.B.34.d neuere Kritikalitätsparameter aus 2008 angegeben /KIL 09/. Diese Daten wurden mit dem S_N -Code XSDRNPM (Steuersequenz CSAS1X) und der auf ENDF/B-V basierten 238-Gruppenbibliothek aus dem Codepaket SCALE 4.4a /RSI 00/ neu berechnet.

In Abb. 1.B.21 und Abb. 1.B.22 sind zudem kritische und sichere Werte für optimal moderiertes Urandioxid in Zylinder- und Schichtgeometrie mit äußerer Cadmiumvergiftung angegeben.

Tab. 1.B.A Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene sphärische Urandioxid-Wasser-Systeme bei reaktivster Urankonzentration

Anreicherung [Gew% ²³⁵ U]	Masse [kg Uran]		Volumen [Liter]	
	kritisch	sicher ²	kritisch	sicher ²
1,17	5880	2645	1710	935
1,3	2290	1030	714	475
1,5	1037	465	358	249
2 (ENDF/B-IV)	303	136	129	103
2 (ENDF/B-VII.0)	280	126	116,9	93,5
3 (ENDF/B-IV)	102	45,8	55,3	44,2
3 (ENDF/B-VII.0)	97,1	43,7	52,1	41,7
4 (ENDF/B-IV)	55,8	25,1	36,6	29,3
4 (ENDF/B-VII.0)	54,2	24,4	34,9	27,9
5 (ENDF/B-IV)	37,7	17,0	28,9	23,1
5 (ENDF/B-VII.0)	36,5	16,4	27,2	21,7
6 (ENDF/B-V)	27,0	12,1	23,1	18,4
6 (ENDF/B-VII.0)	27,1	12,2	22,8	18,2
7 (ENDF/B-V)	22	9,9	22,0	17,6
8 (ENDF/B-V)	17,5	7,8	18,0	14,4
10	13	5,9	16,0	12,8
20	5,0	2,3	10,8	8,6
30	3,2	1,4	9,2	7,3
40	2,35	1,05	8,5	6,8
50 ¹	1,75	0,78	7,7	6,1
93 ¹	0,85	0,36	5,8	4,6
100 ¹	0,80	0,35	5,6	4,6

¹ Gilt nur für Urankonzentrationen ≤ 1 g U/cm³.

² Sicherheitsfaktoren:

Sichere Masse ≤ 45 % der kritischen Masse **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

Sicheres Volumen ≤ 80 % des kritischen Volumens **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

Tab. 1.B.B Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene Urandioxid-Wasser-Systeme in Zylinder- und Schichtgeometrie bei reaktivster Urankonzentration

Anreicherung [Gew% ²³⁵ U]	Durchmesser eines infiniten Zylinders [cm]		Dicke einer infiniten Schicht [cm]	
	kritisch	sicher ¹	kritisch	sicher ¹
1,17	110,0	89,5	67,0	53,5
1,3	81,5	70,7	48,2	41,2
1,5	64,3	56,4	37,1	37,9
2 (ENDF/B-IV)	47,6	42,8	25,0	22,4
2 (ENDF/B-VII.0)	43,1	38,8	23,3	21,0
3 (ENDF/B-IV)	33,2	30,0	17,0	15,5
3 (ENDF/B-VII.0)	32,2	29,0	16,3	14,6
4 (ENDF/B-IV)	28,6	25,7	14,0	12,3
4 (ENDF/B-VII.0)	27,8	25,0	13,5	12,1
5 (ENDF/B-IV)	26,1	23,5	12,4	11,0
5 (ENDF/B-VII.0)	25,4	22,8	11,9	10,7
6 (ENDF/B-V)	23,9	21,5	11,1	10,0
6 (ENDF/B-VII.0)	23,8	21,4	10,9	9,8
7 (ENDF/B-V)	23,0	20,7	10,7	9,6
8 (ENDF/B-V)	21,9	19,7	9,7	8,7
10	20,5	18,5	9,3	8,3
20	17,8	16,0	7,5	6,6
30	16,7	15,0	6,8	5,8
40	16,0	14,4	6,3	5,4
50 ¹	15,3	13,7	6,0	5,0
93 ¹	14,2	12,7	5,2	3,8
100 ¹	14,0	12,7	4,8	3,8

¹ Gilt nur für Urankonzentrationen $\leq 1 \text{ g U/cm}^3$.

¹ Sicherheitsfaktoren:

Sichere Dimension $\leq 90\%$ der kritischen Dimension **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

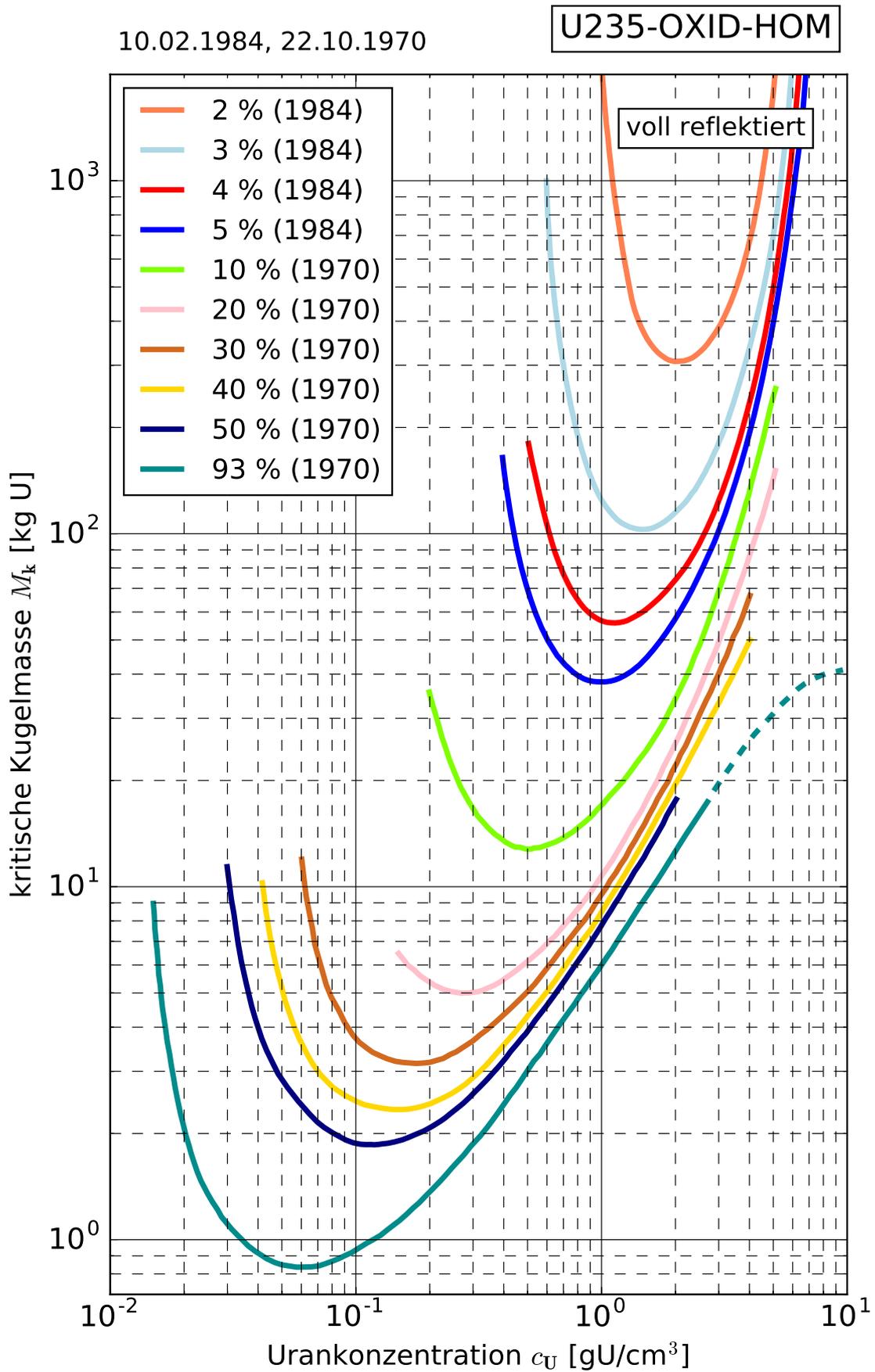


Abb. 1.B.1.a Kritische Kugelmasse von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen (1970, 1984)

07.08.2001, 20.01.2010

U235-OXID-HOM

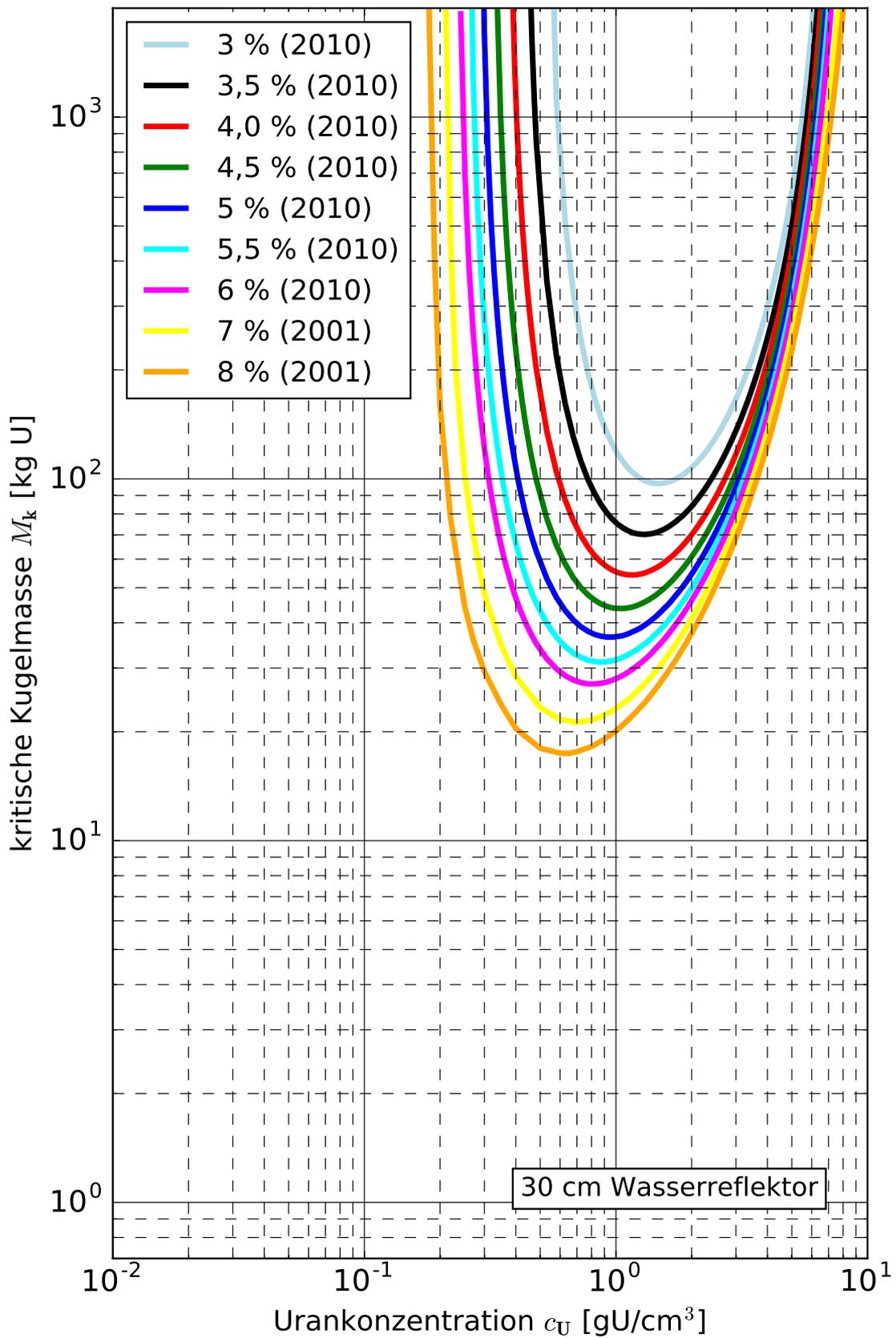


Abb. 1.B.1.b Kritische Kugelmasse von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen (2001, 2010)

10.02.1984, 22.10.1970

U235-OXID-HOM

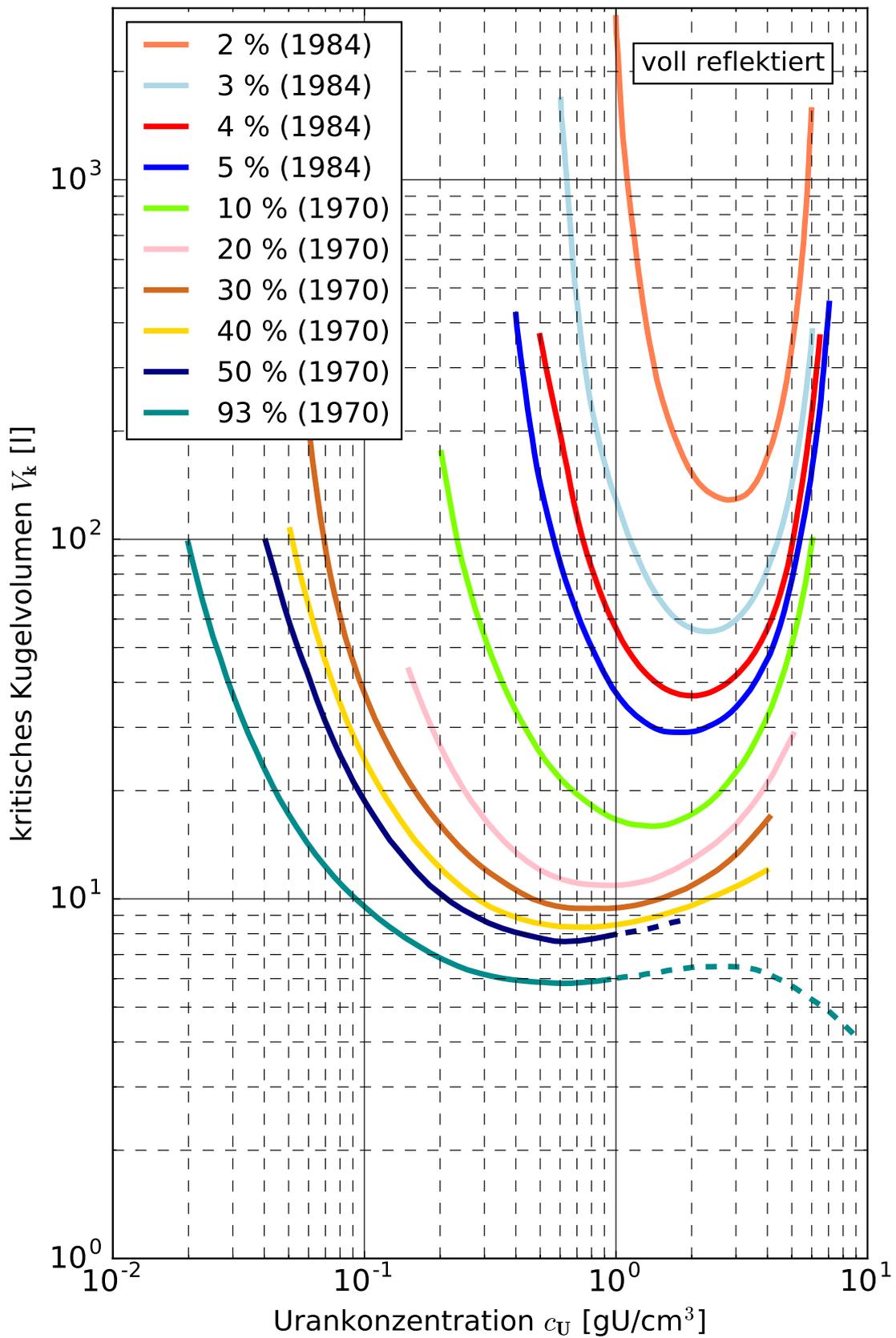


Abb. 1.B.2.a Kritisches Kugelvolumen von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen (1970, 1984)

07.08.2001, 08.02.2011

U235-OXID-HOM

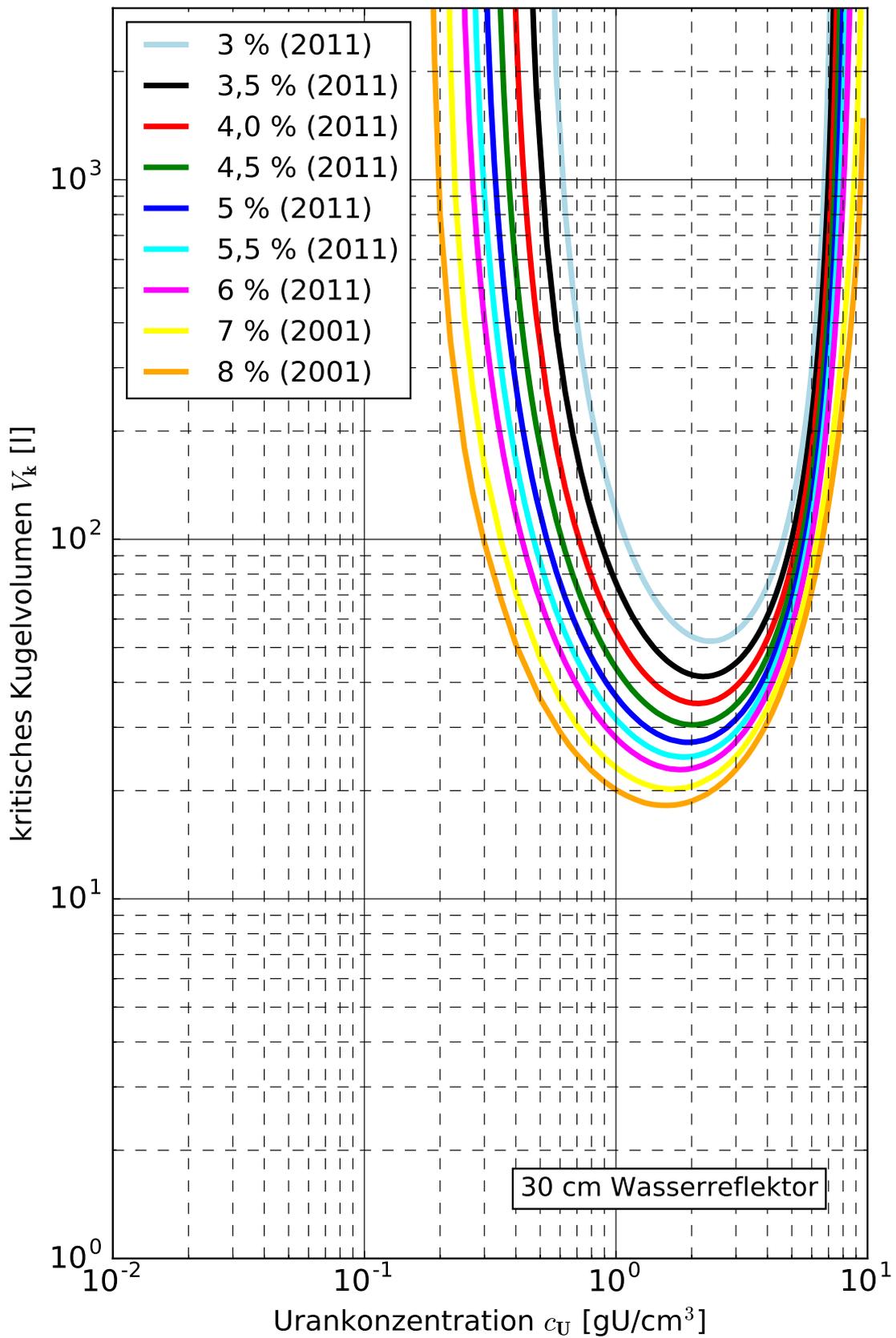


Abb. 1.B.2.b Kritisches Kugelvolumen von homogenen Urndioxid-Wasser-Systemen (2001, 2011)

10.02.1984, 22.10.1970

U235-OXID-HOM

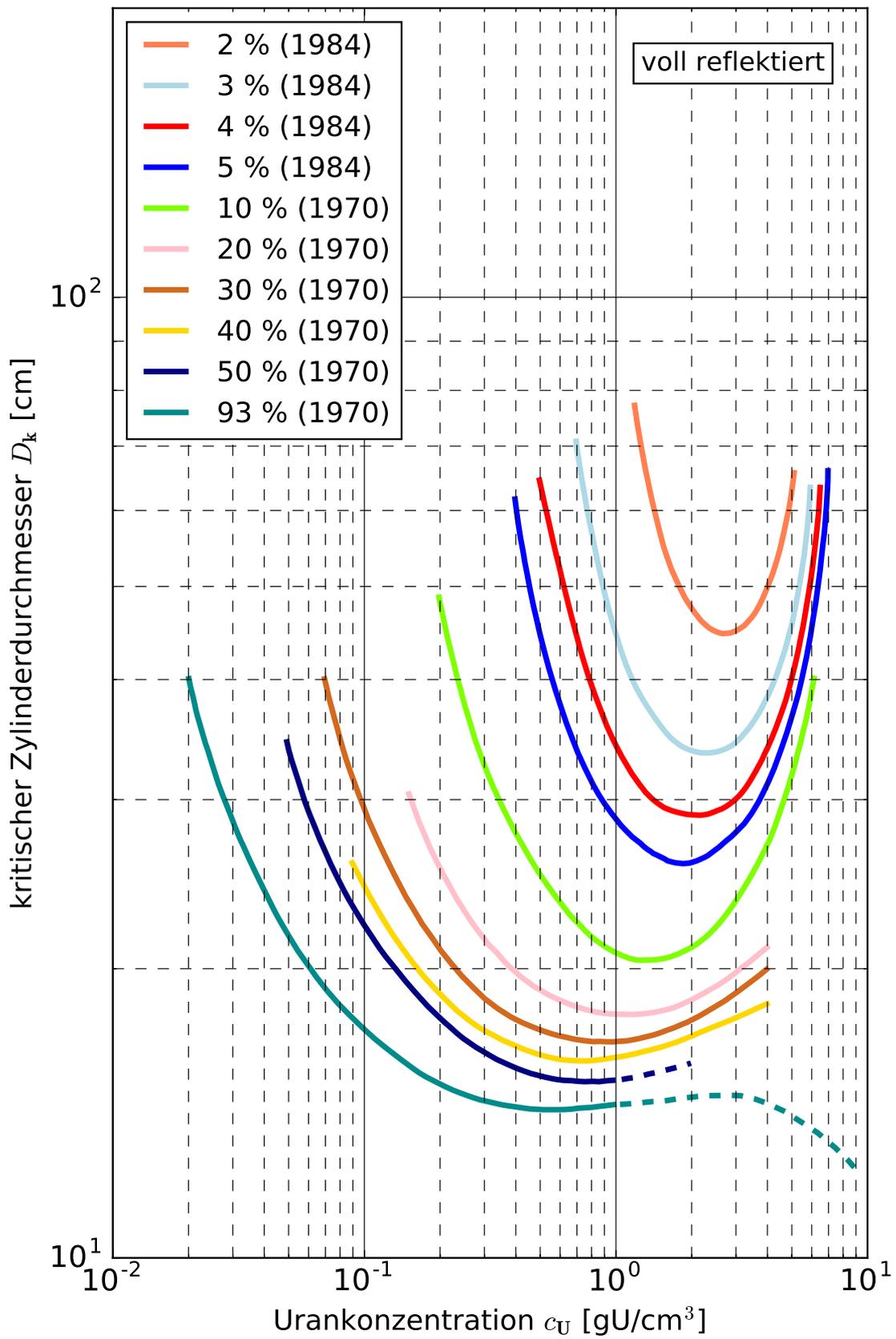


Abb. 1.B.3.a Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen (1970, 1984)

09.08.2001, 08.02.2011

U235-OXID-HOM

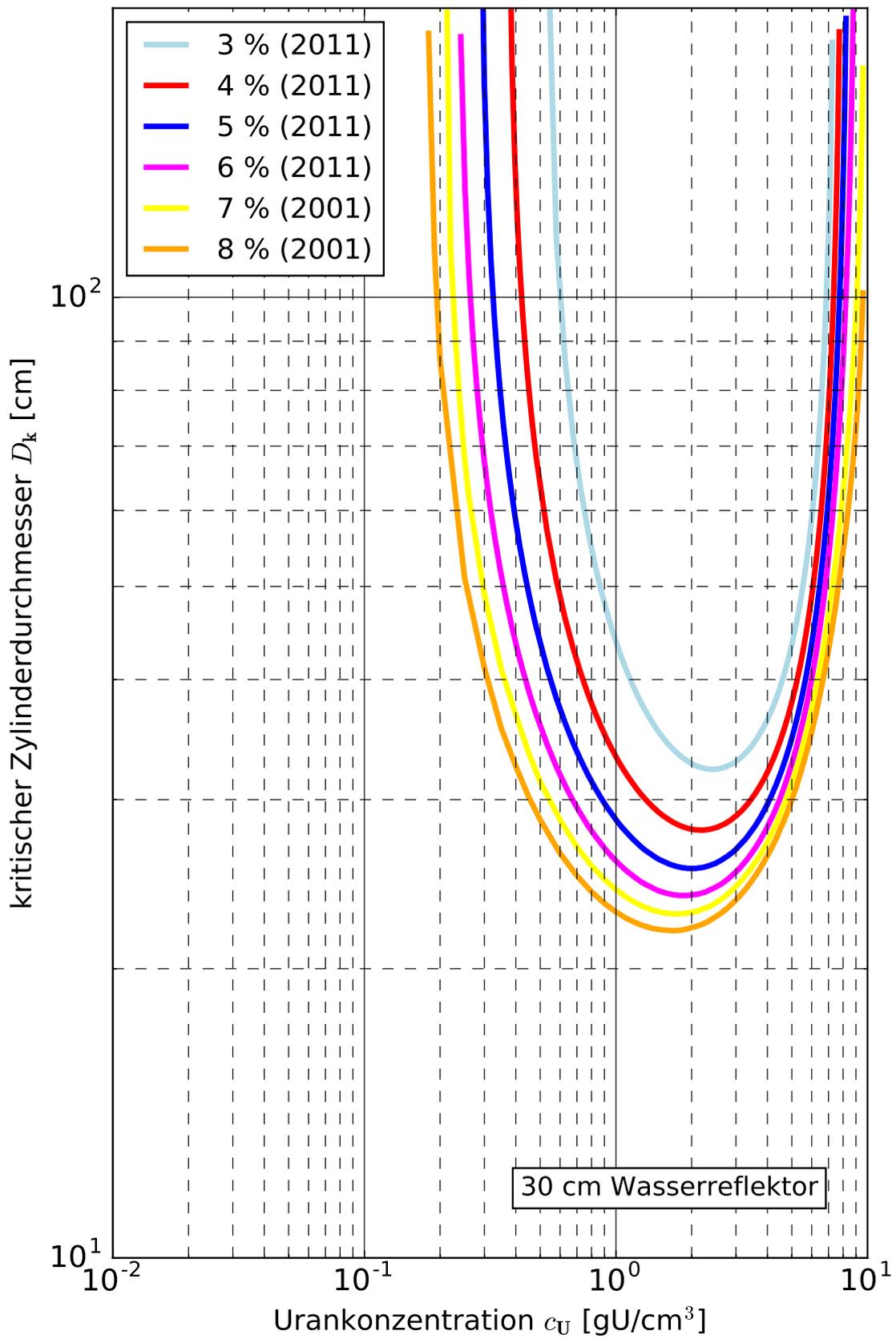


Abb. 1.B.3.b Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen (2001, 2011)

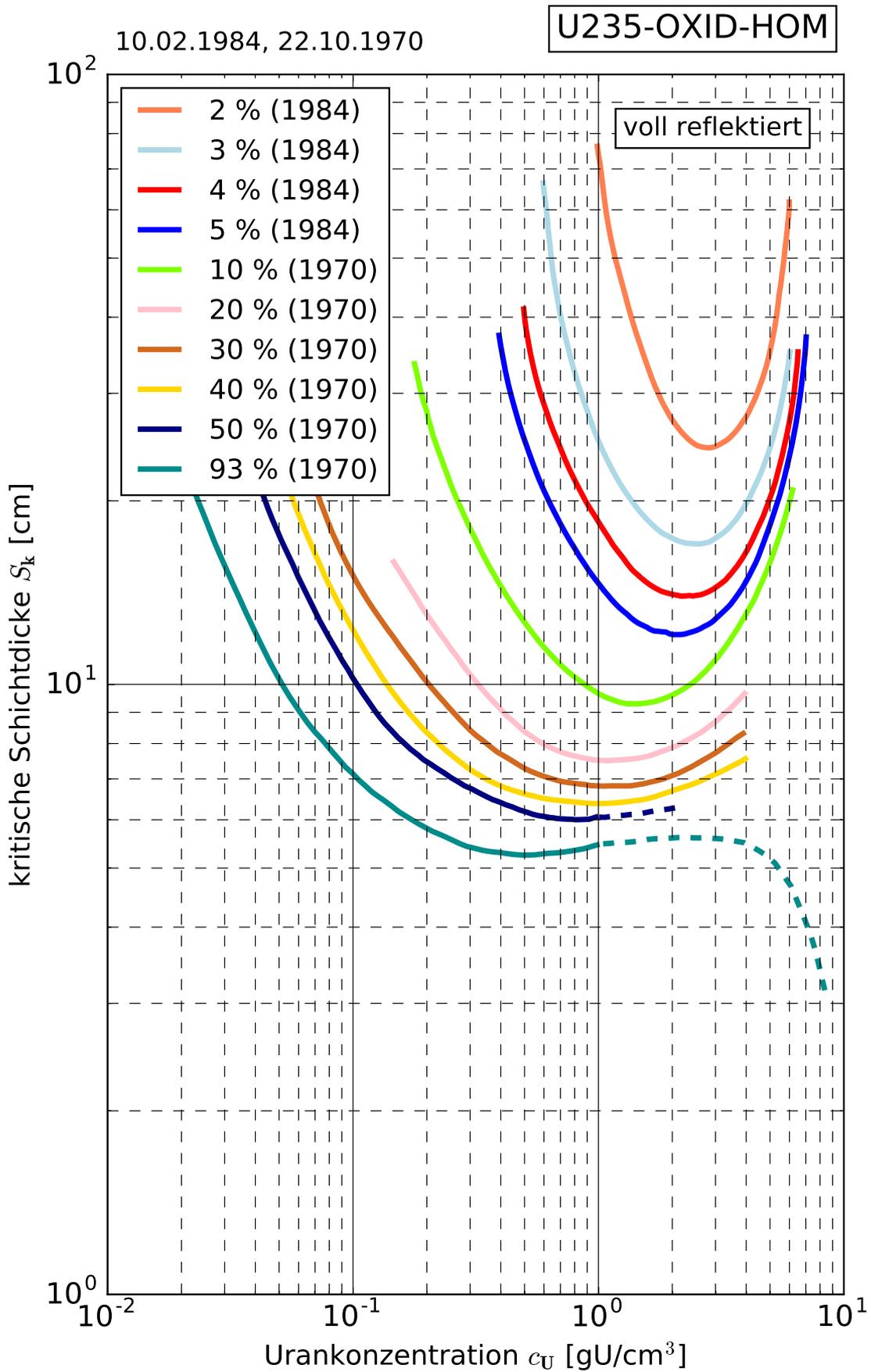


Abb. 1.B.4.a Kritische Schichtdicke von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen (1970, 1984)

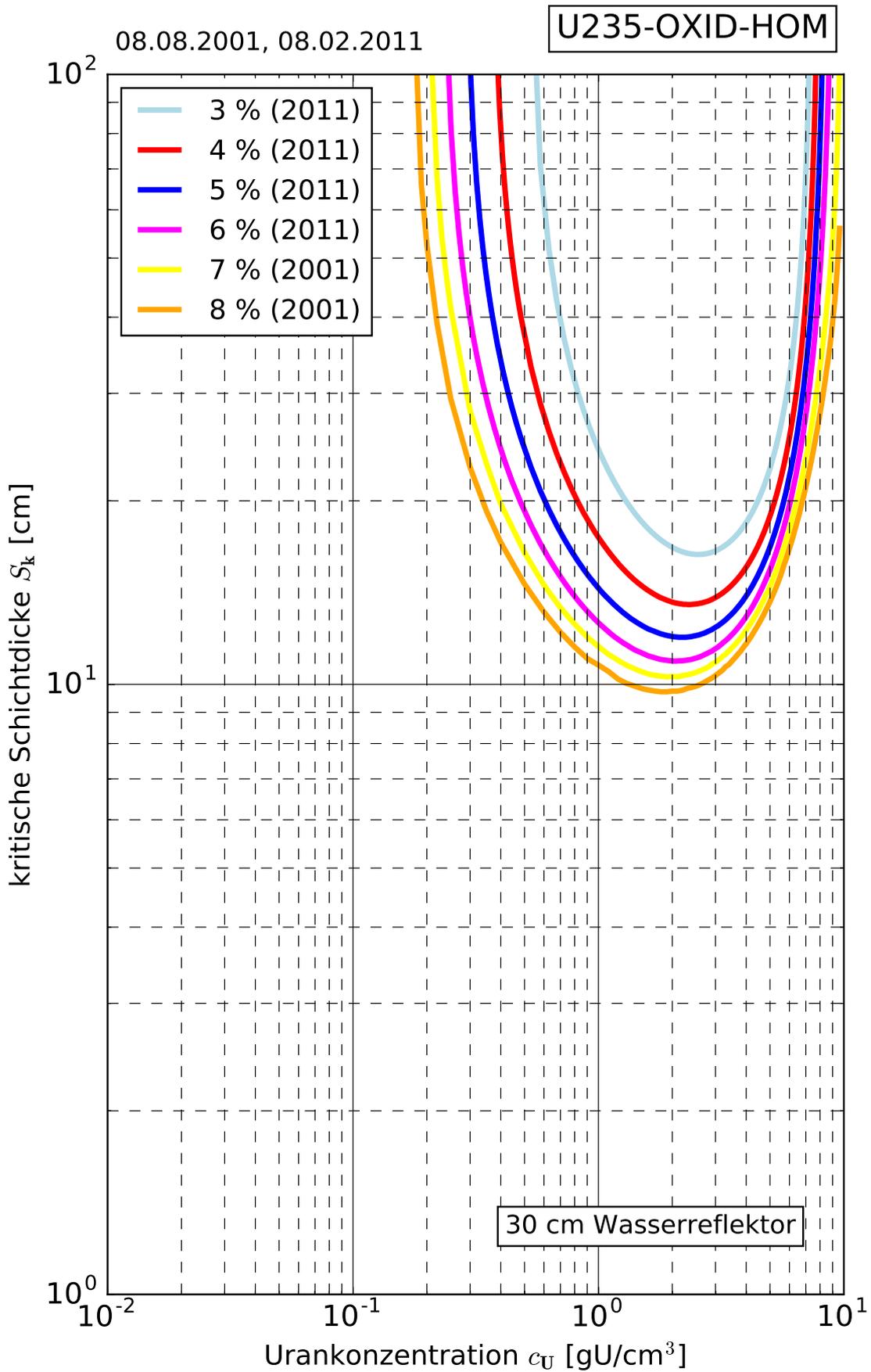


Abb. 1.B.4.b Kritische Schichtdicke von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen (2001, 2011)

03.11.2010

U235-OXID-HOM

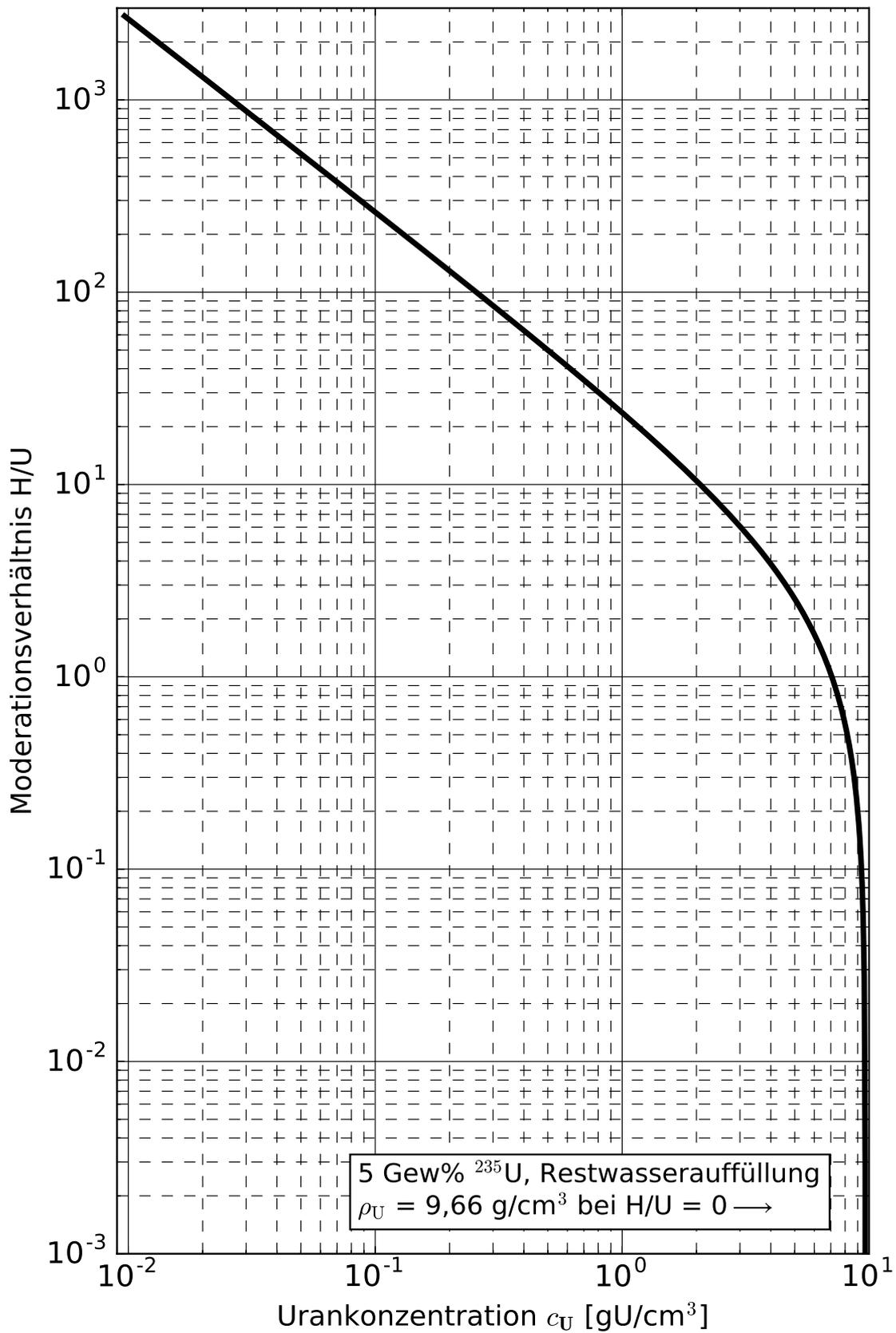


Abb. 1.B.5 Moderationsverhältnis von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen

11.09.2012

U235-OXID-HOM

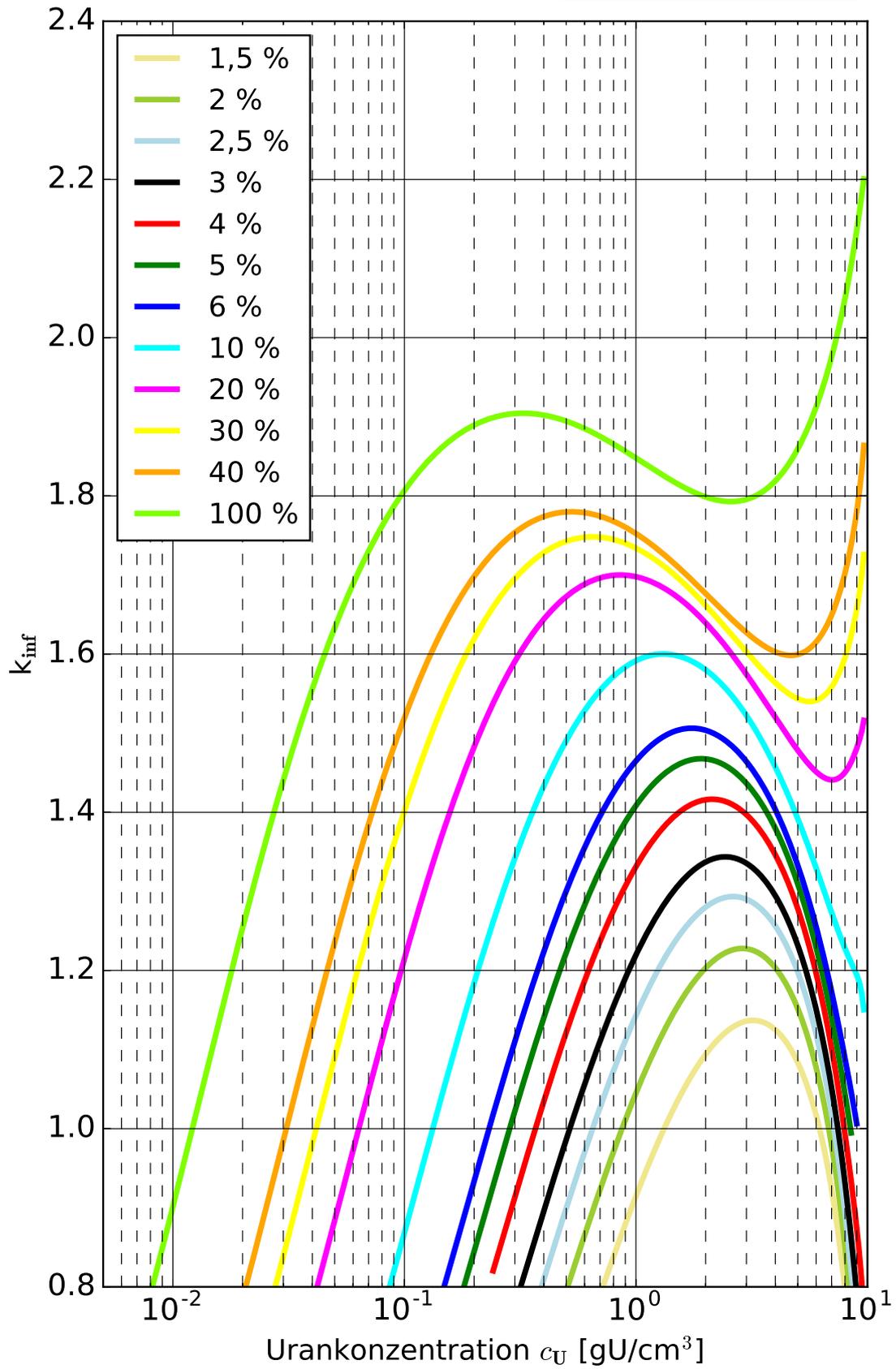


Abb. 1.B.6.a Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen

07.03.2012

U235-OXGD-HOM

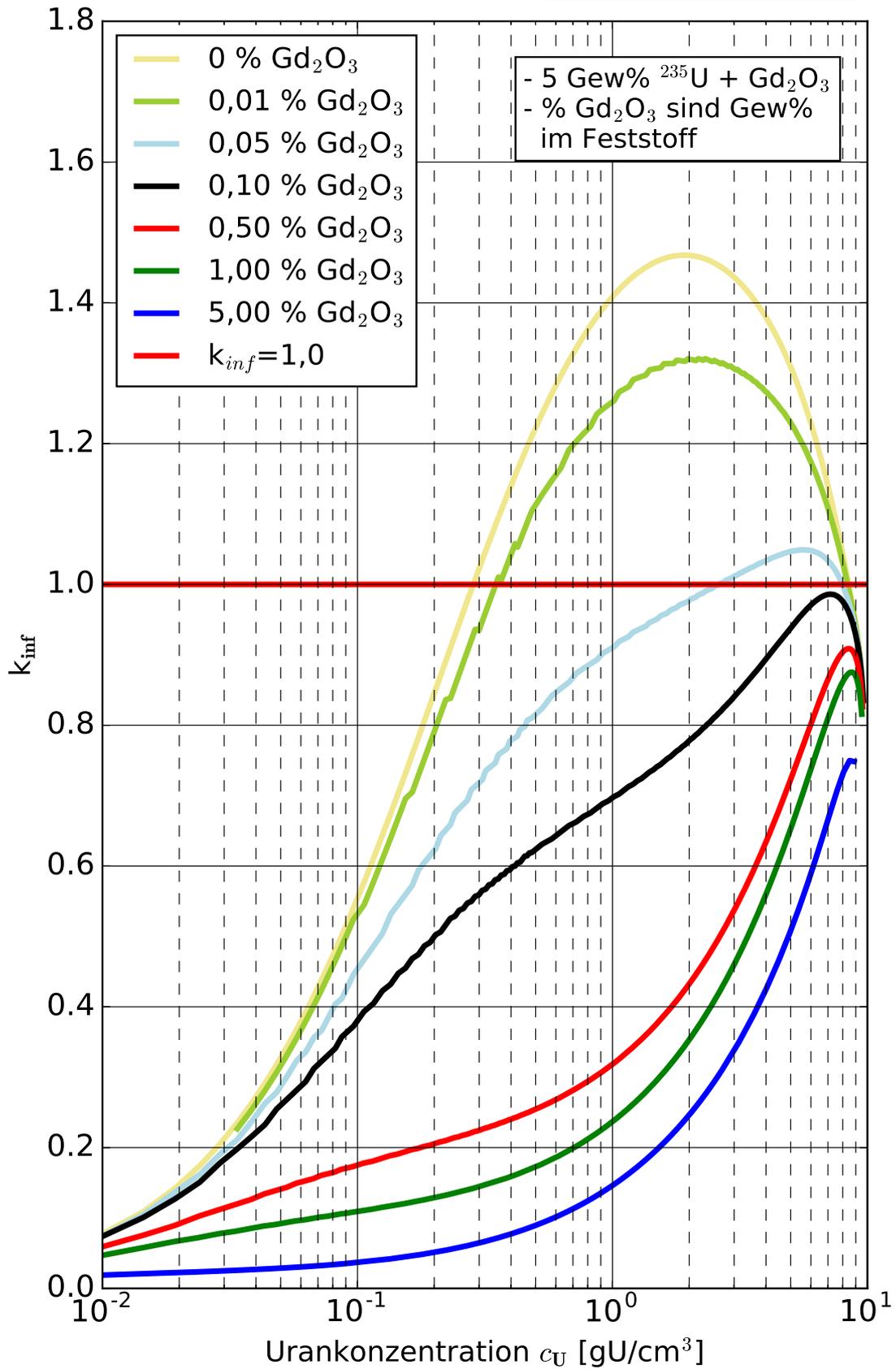


Abb. 1.B.6.b Infinites Multiplikationsfaktor von homogenen Urandioxid-/Gadoliniumoxid-Wasser-Systemen

11.09.2012

U235-OXID-HOM

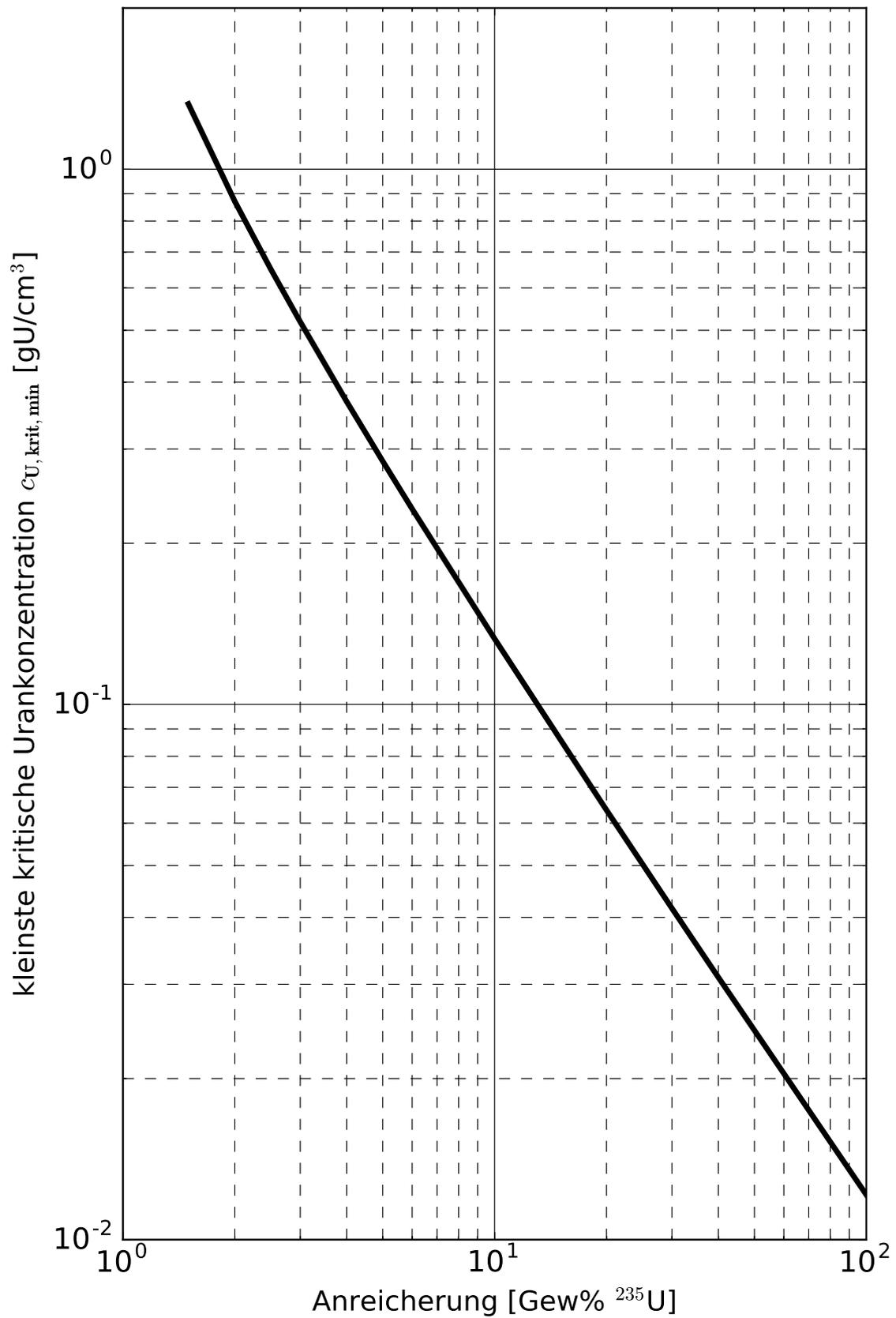


Abb. 1.B.7 Kleinste kritische Konzentration von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen

11.09.2012

U235-OXID-HOM

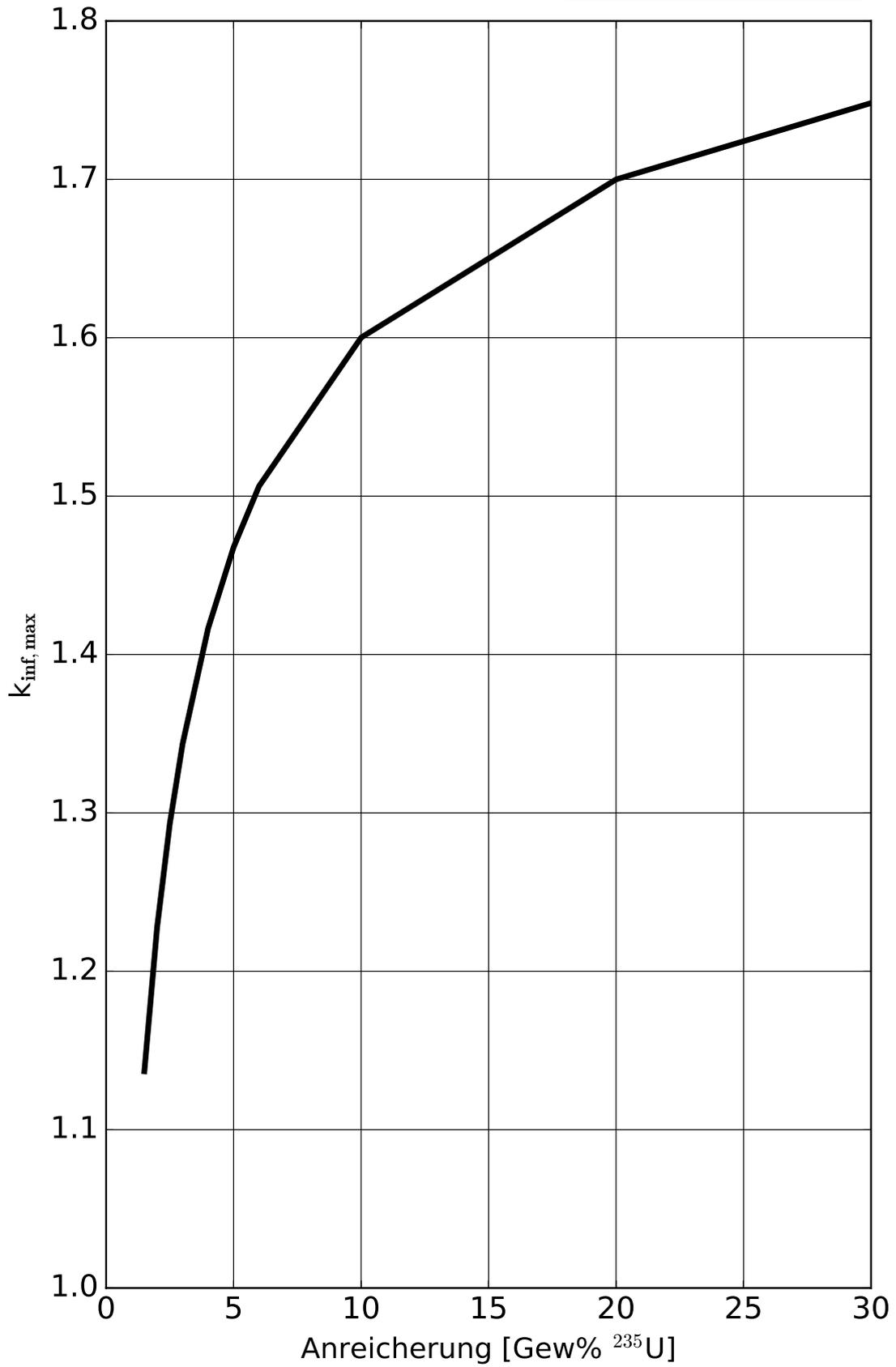


Abb. 1.B.8 Maximaler infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen Urndioxid-Wasser-Systemen

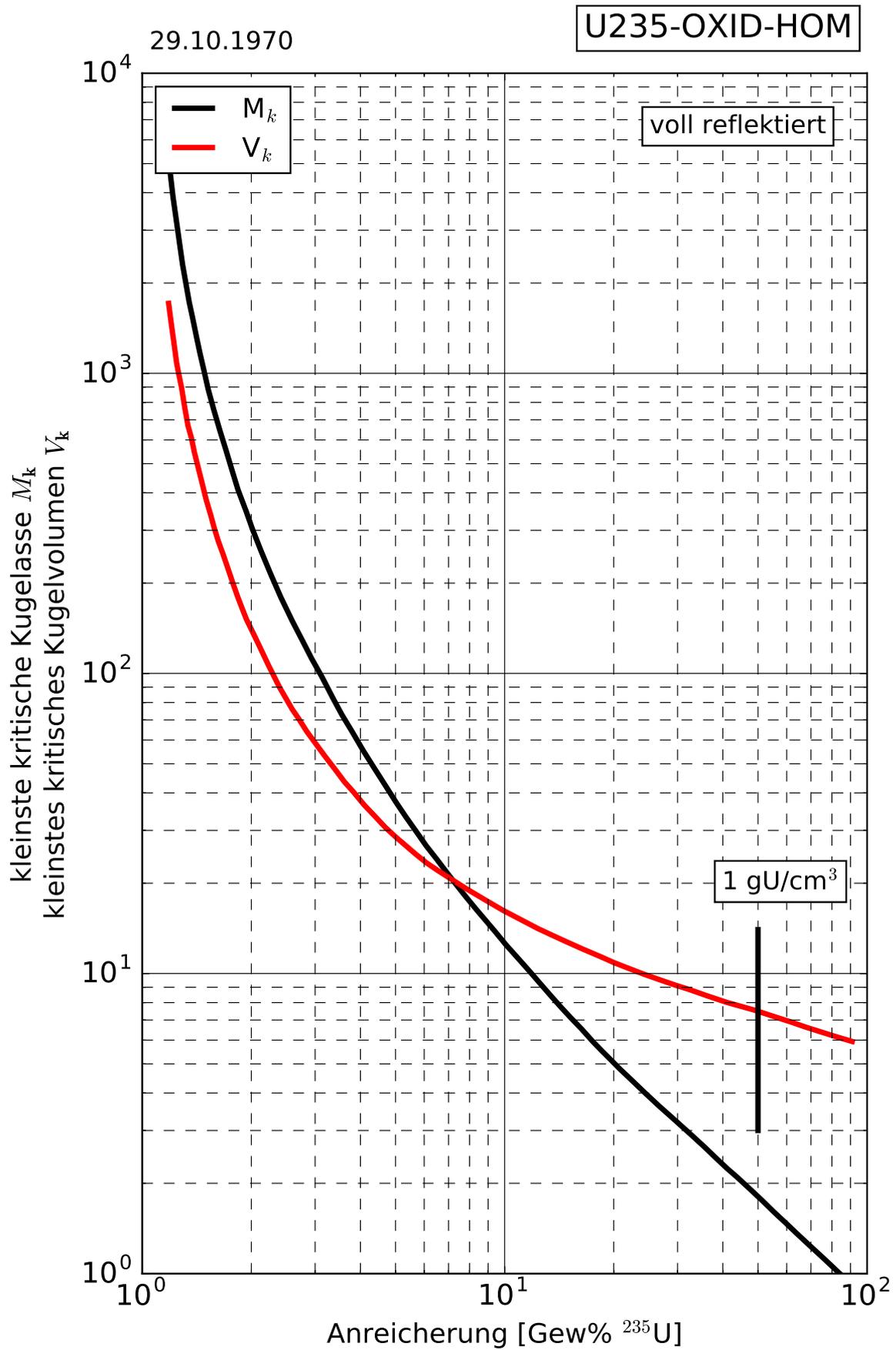


Abb. 1.B.10 Kleinste kritische Kugelmasse und kleinstes kritisches Kugelvolumen von homogenen Urndioxid-Wasser-Systemen

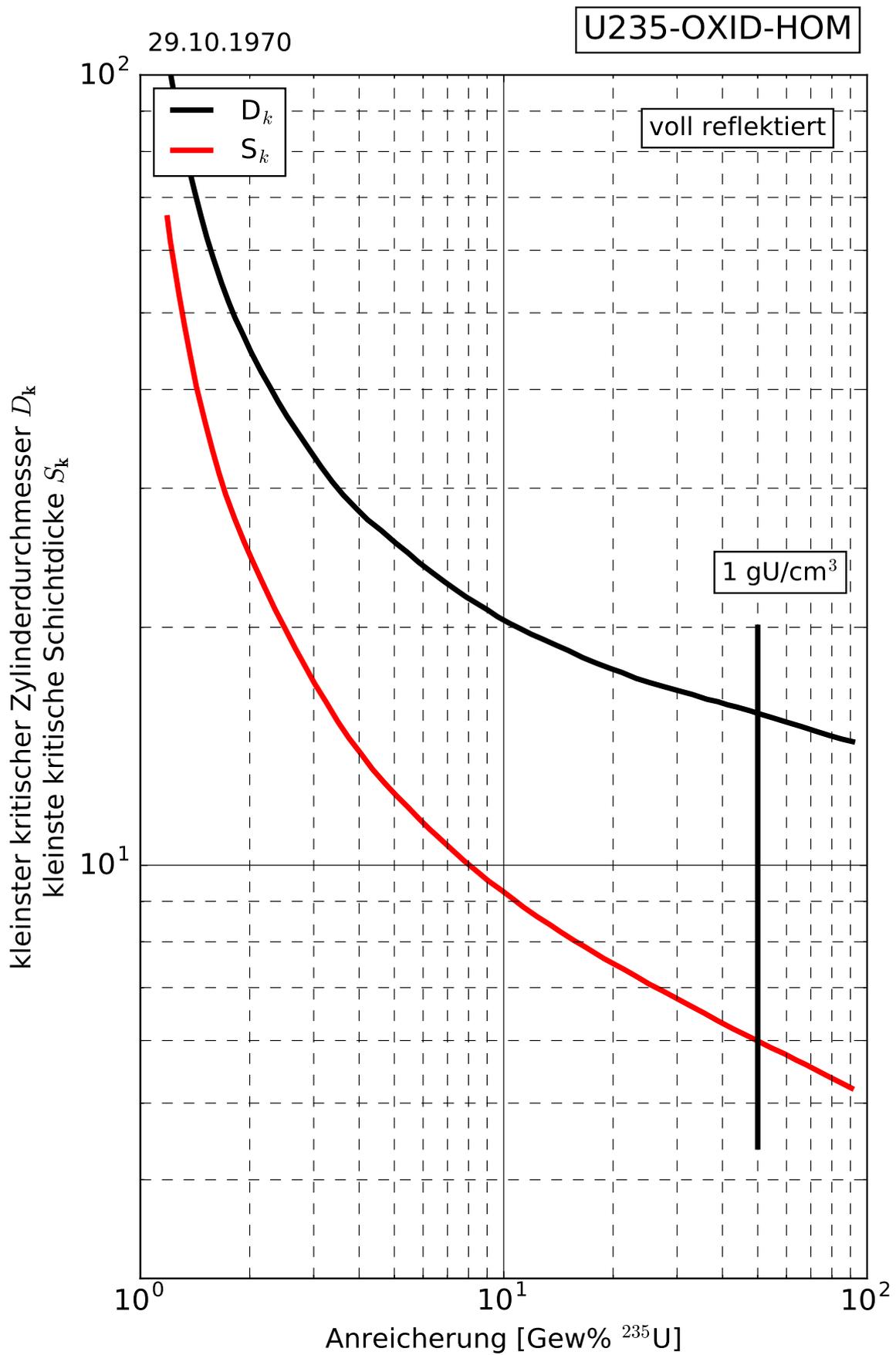


Abb. 1.B.11 Kleinste kritische Dimension von homogenen Urndioxid-Wasser-Systemen

27.05.1971

U235-OXID-HOM

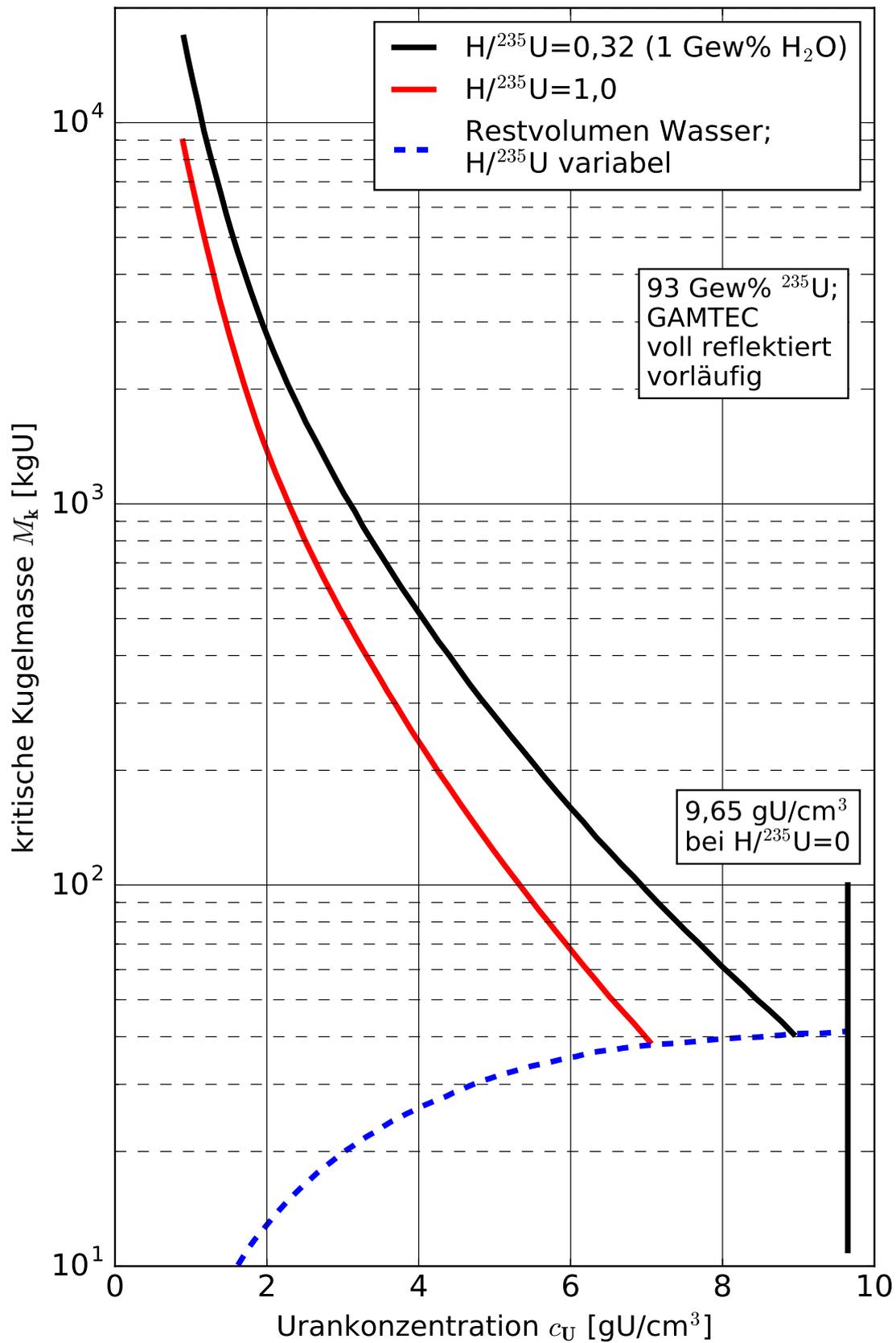


Abb. 1.B.12 Kritische Kugelmasse von homogenen, untermoderierten Urandioxid-Wasser-Systemen bei verminderter Dichte, 93 % ^{235}U -Anreicherung

27.05.1971

U235-OXID-HOM

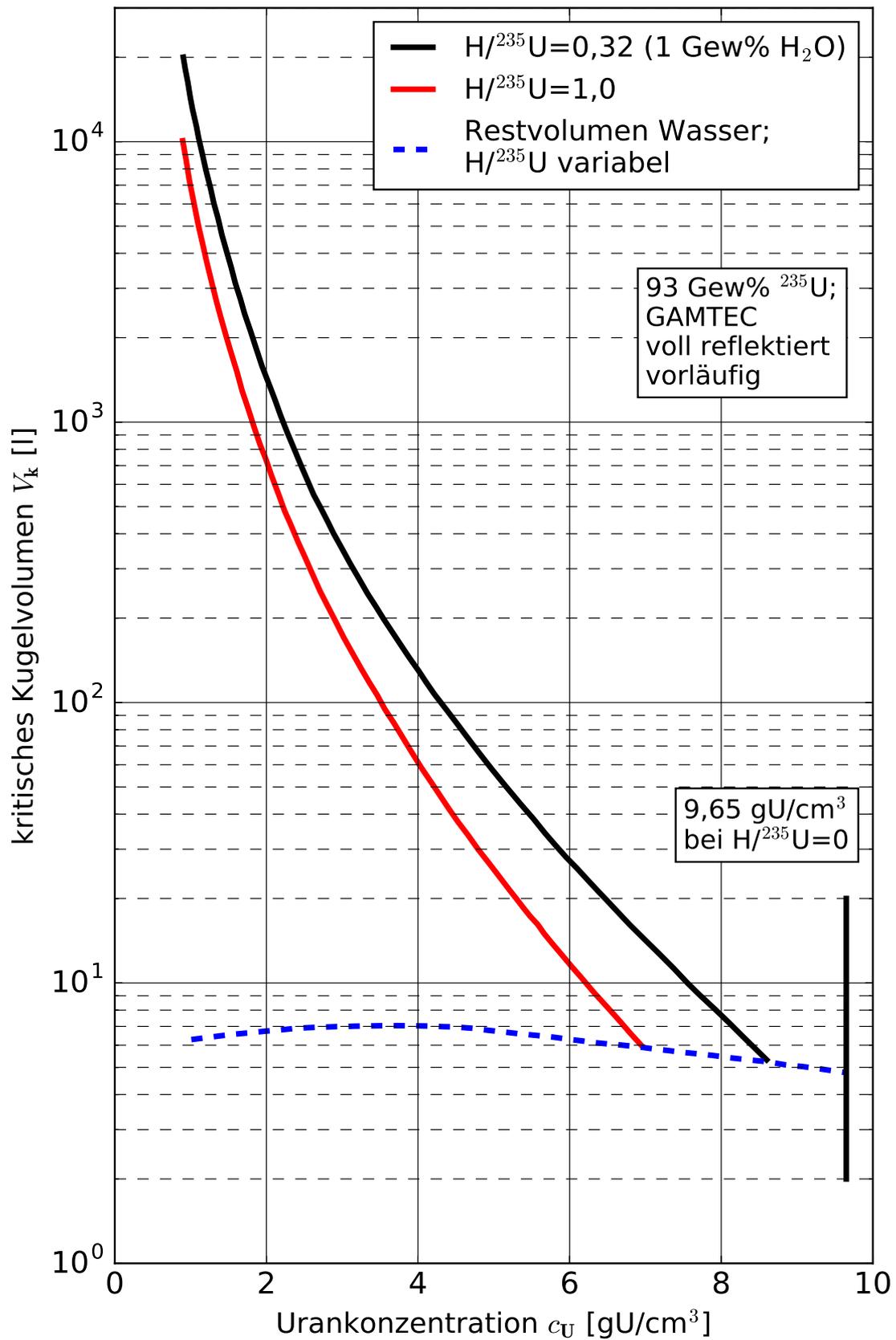


Abb. 1.B.13 Kritisches Kugelvolumen von homogenen, untermoderierten Urandioxid-Wasser-Systemen bei verminderter Dichte, 93 % ^{235}U -Anreicherung

27.05.1971

U235-OXID-HOM

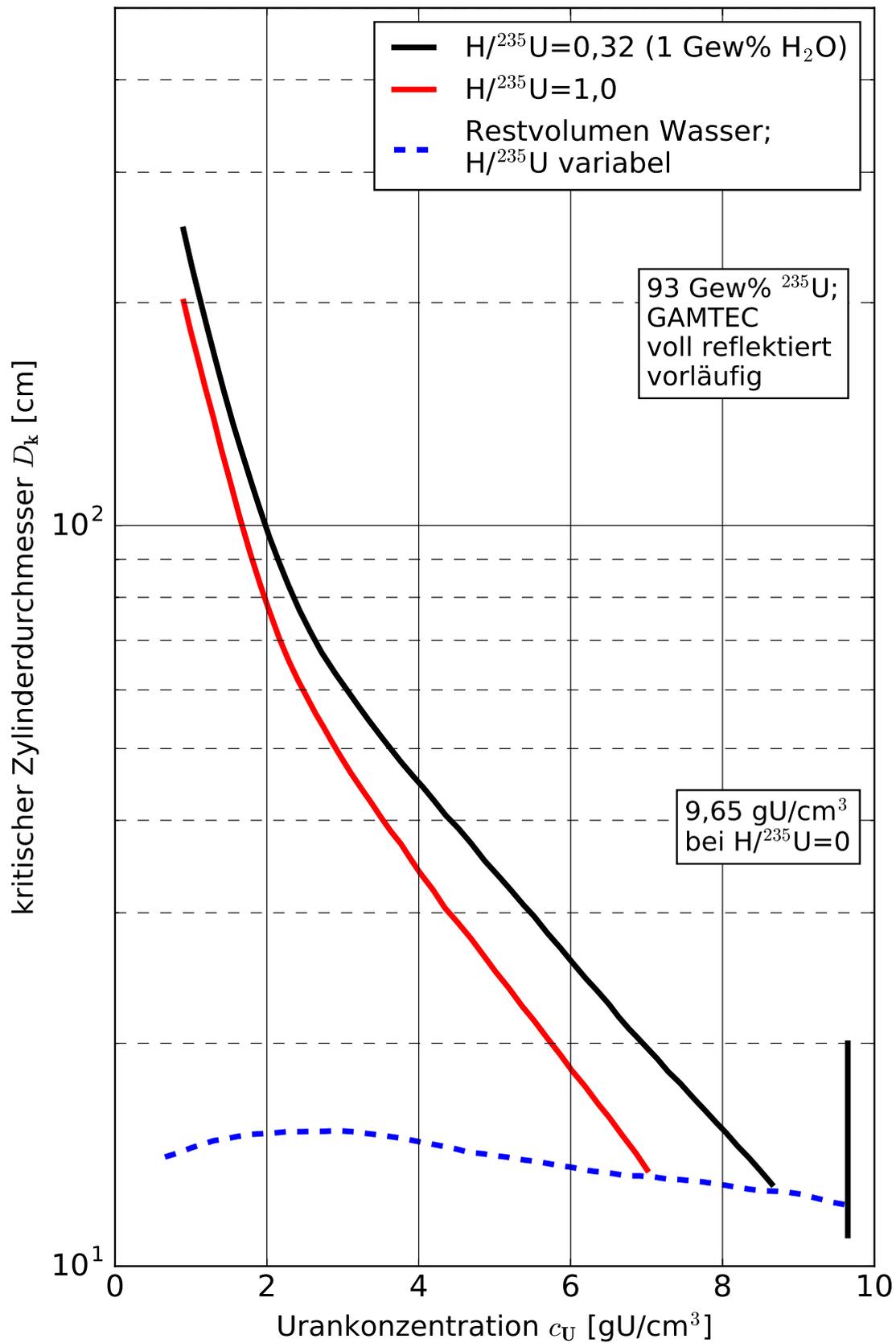


Abb. 1.B.14 Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen, untermoderierten Urandi-oxid-Wasser-Systemen bei verminderter Dichte, 93 % ^{235}U -Anreicherung

27.05.1971

U235-OXID-HOM

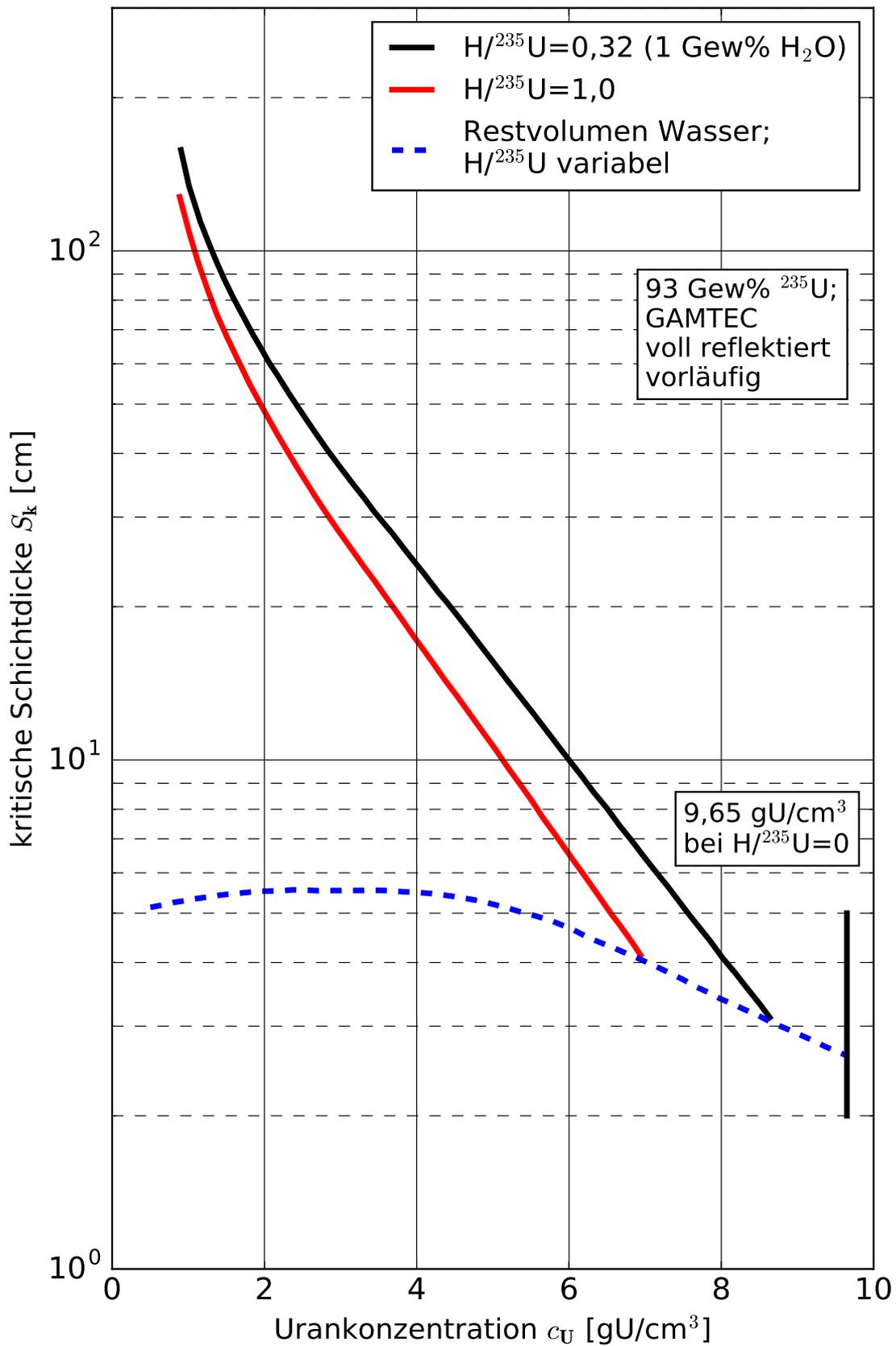


Abb. 1.B.15 Kritische Schichtdicke von homogenen, untermoderierten Urandioxid-Wasser-Systemen bei verminderter Dichte, 93 % ^{235}U -Anreicherung

21.12.1985

U235-OXID-HOM

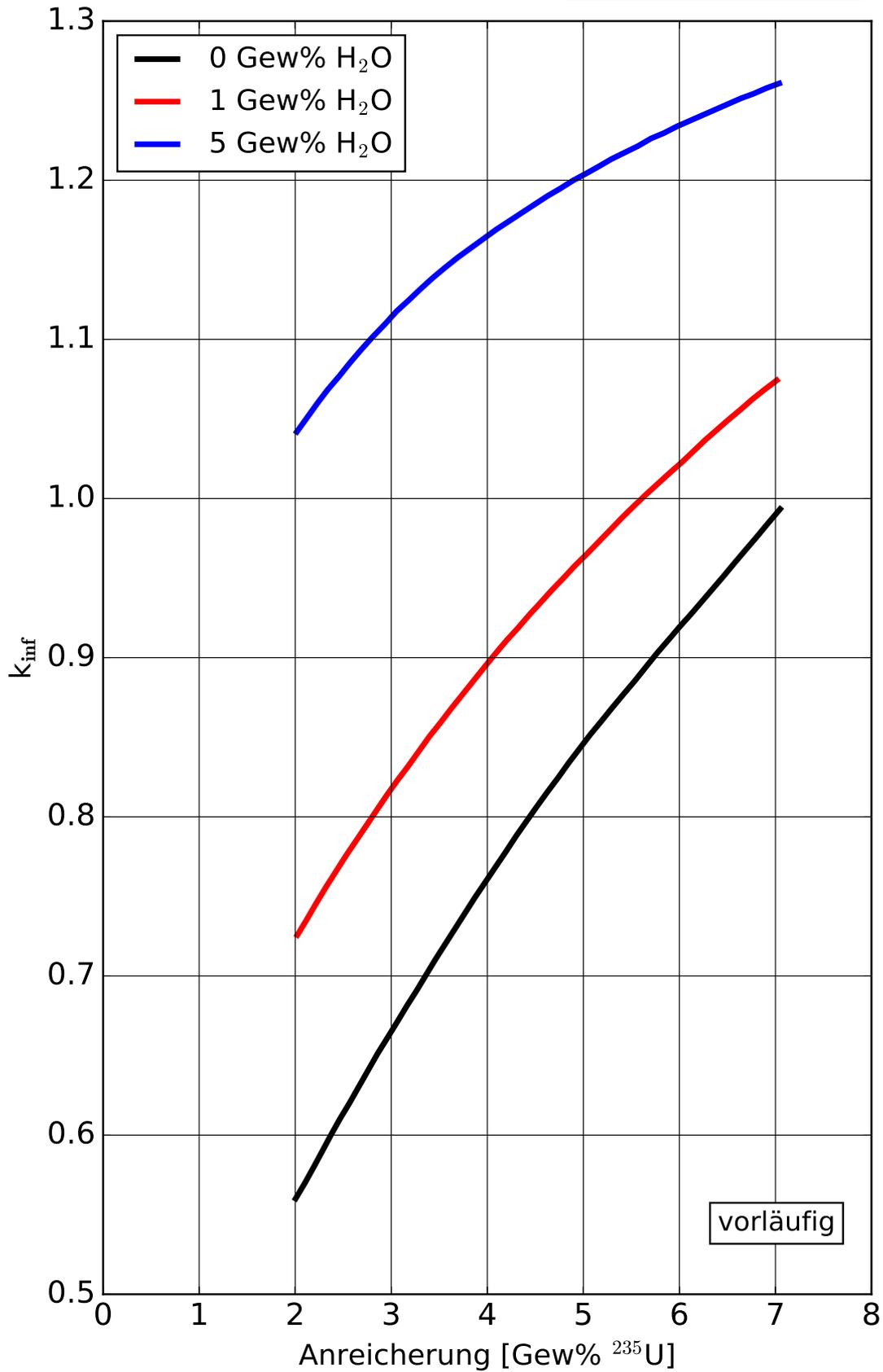


Abb. 1.B.16 Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenem UO₂-Pulver mit und ohne Restfeuchte in Abhängigkeit von der Anreicherung, Gew% H₂O bezogen auf Oxidgewicht

23.11.1977

U235-OXID-HOM

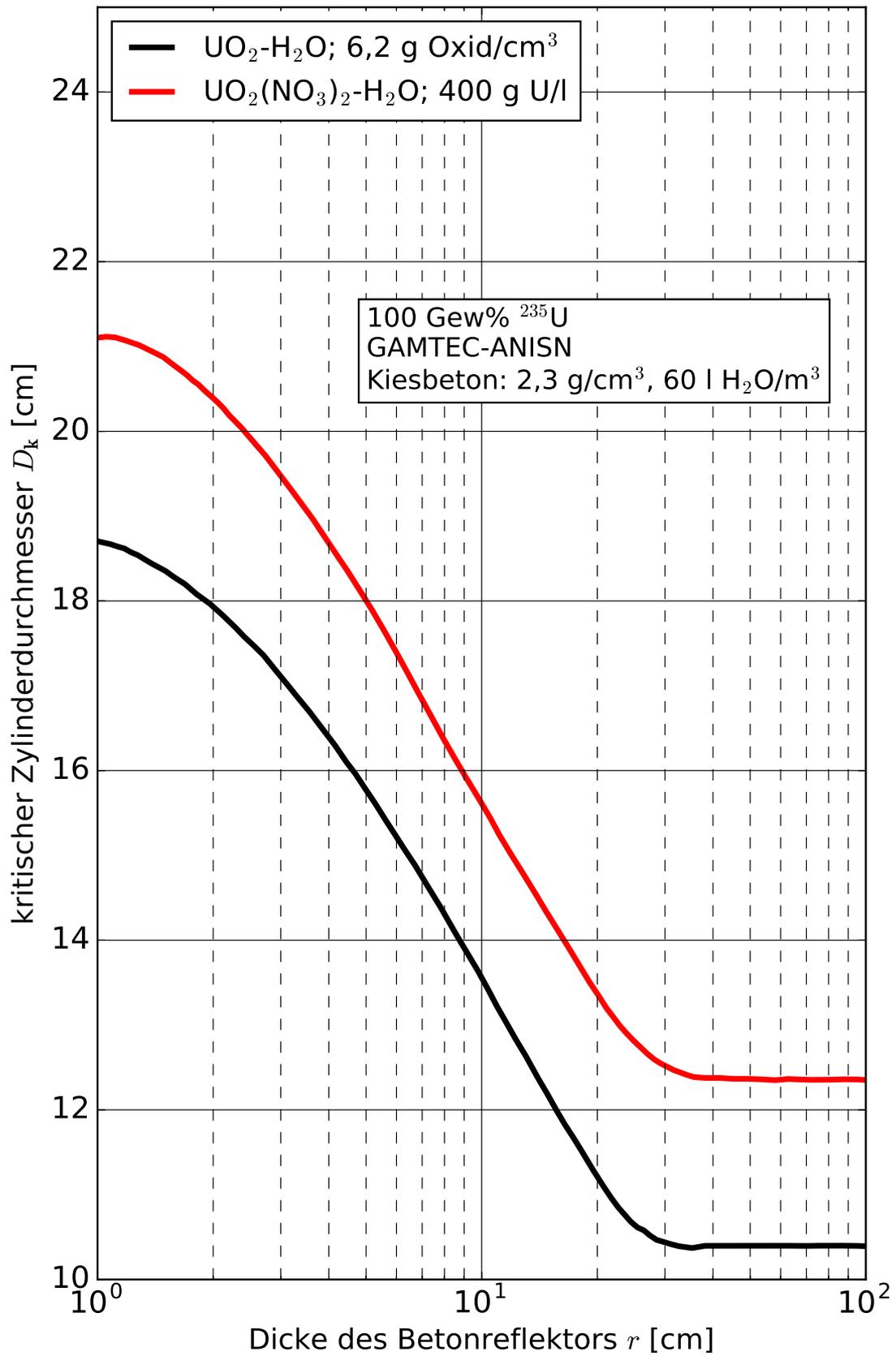


Abb. 1.B.17 Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Mischungen mit Beton in Abhängigkeit der Dicke des Betonreflektors

28.11.1977

U235-OXID-HOM

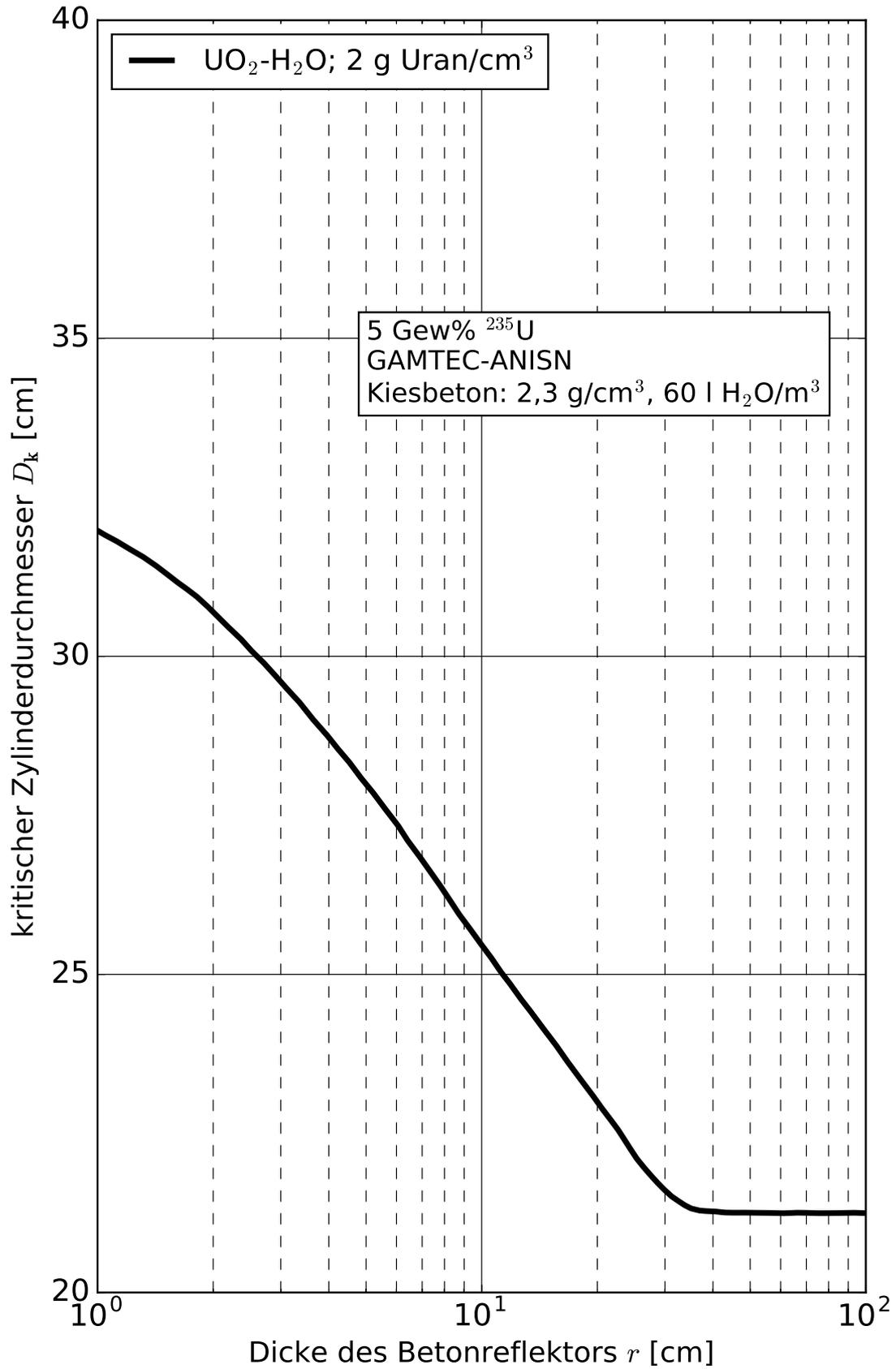


Abb. 1.B.18 Kritischer Zylinderdurchmesser von einer homogenen Mischung mit Beton in Abhängigkeit von der Dicke des Betonreflektors

20.03.1972

U235-OXID-HOM

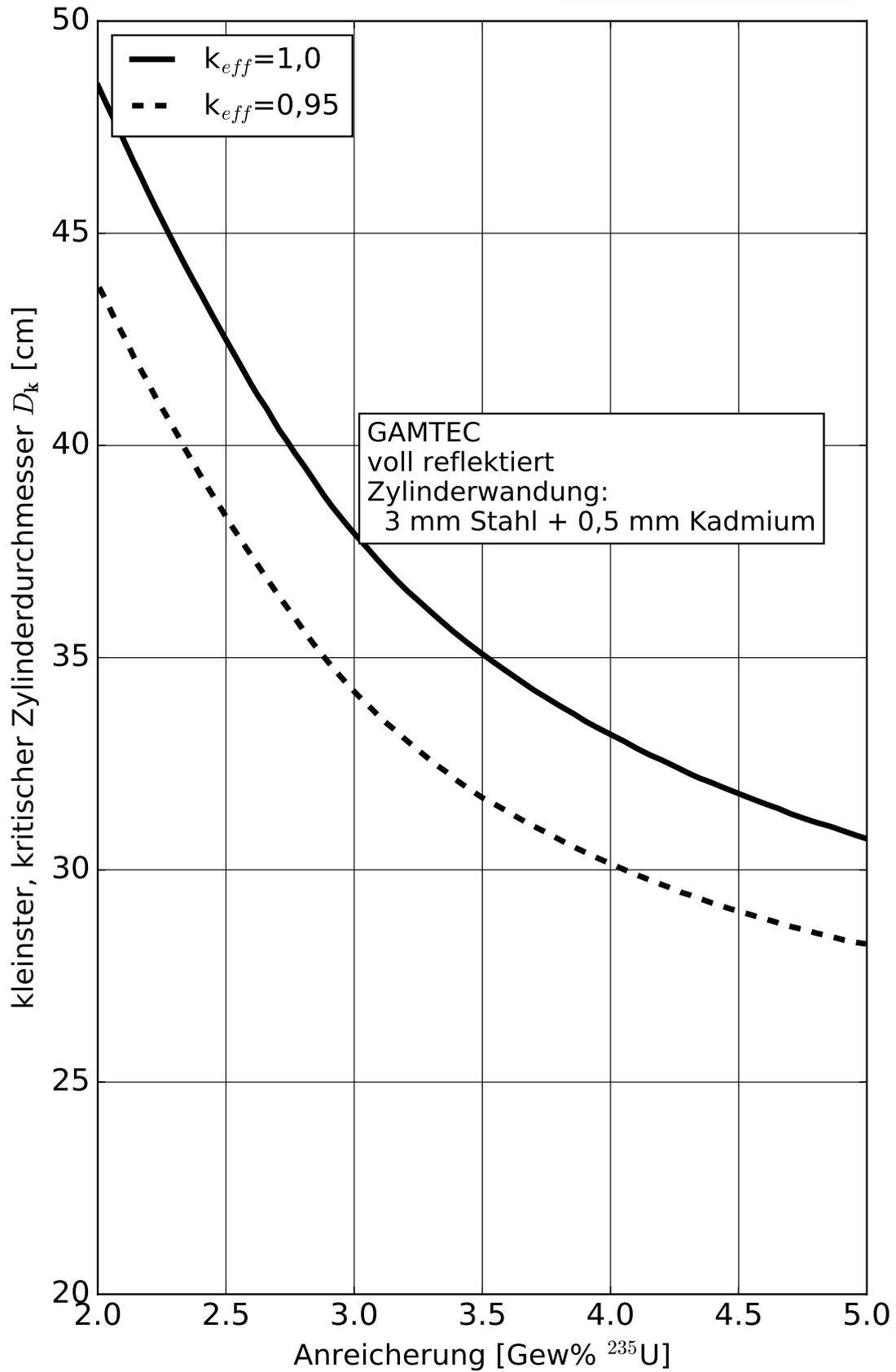


Abb. 1.B.21 Kleinste kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Urndioxid-Wasser-Systemen

12.04.1972

U235-OXID-HOM

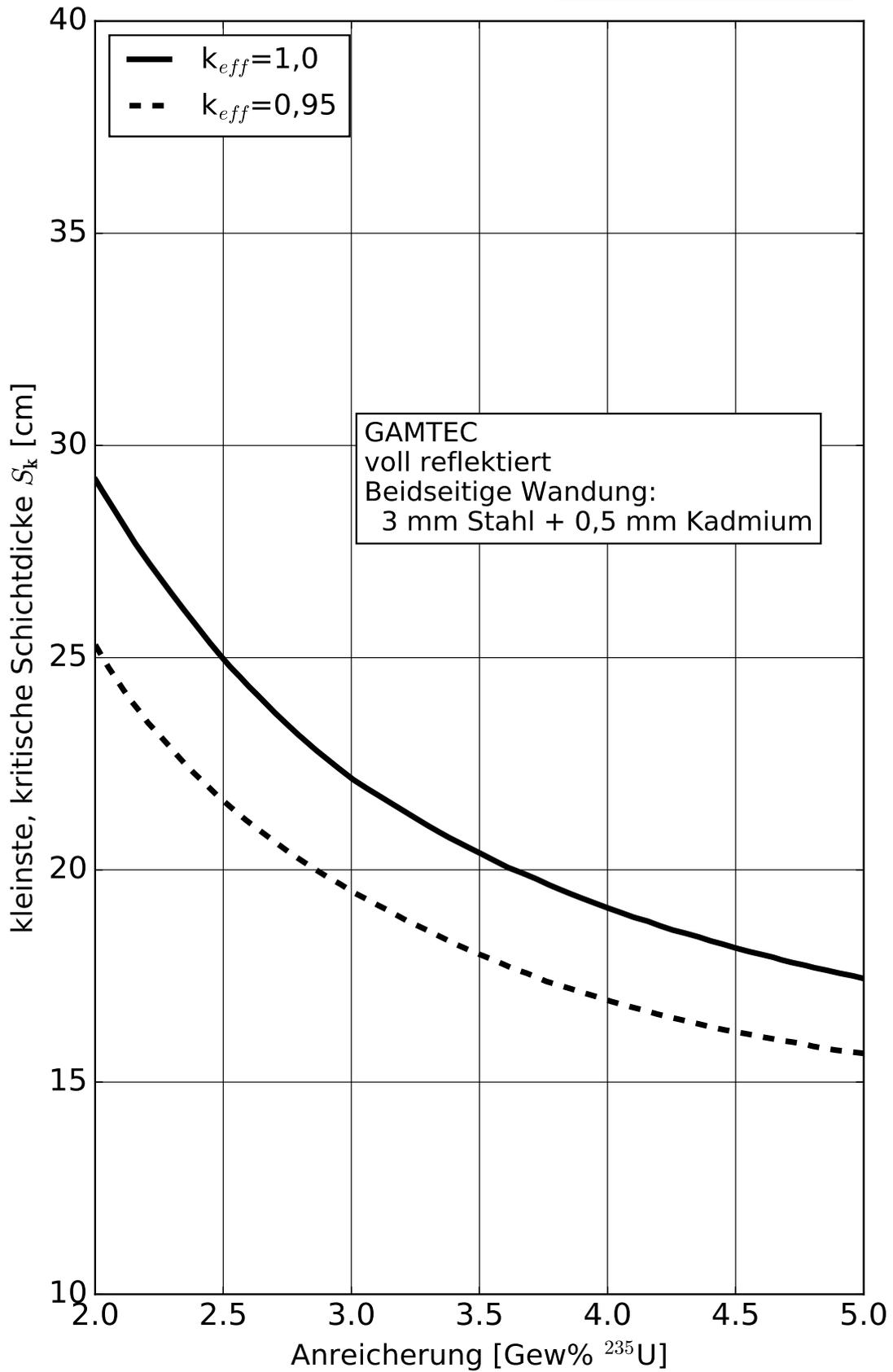


Abb. 1.B.22 Kleinste kritische Schichtdicke von homogenen Urandoxid-Wasser-Systemen

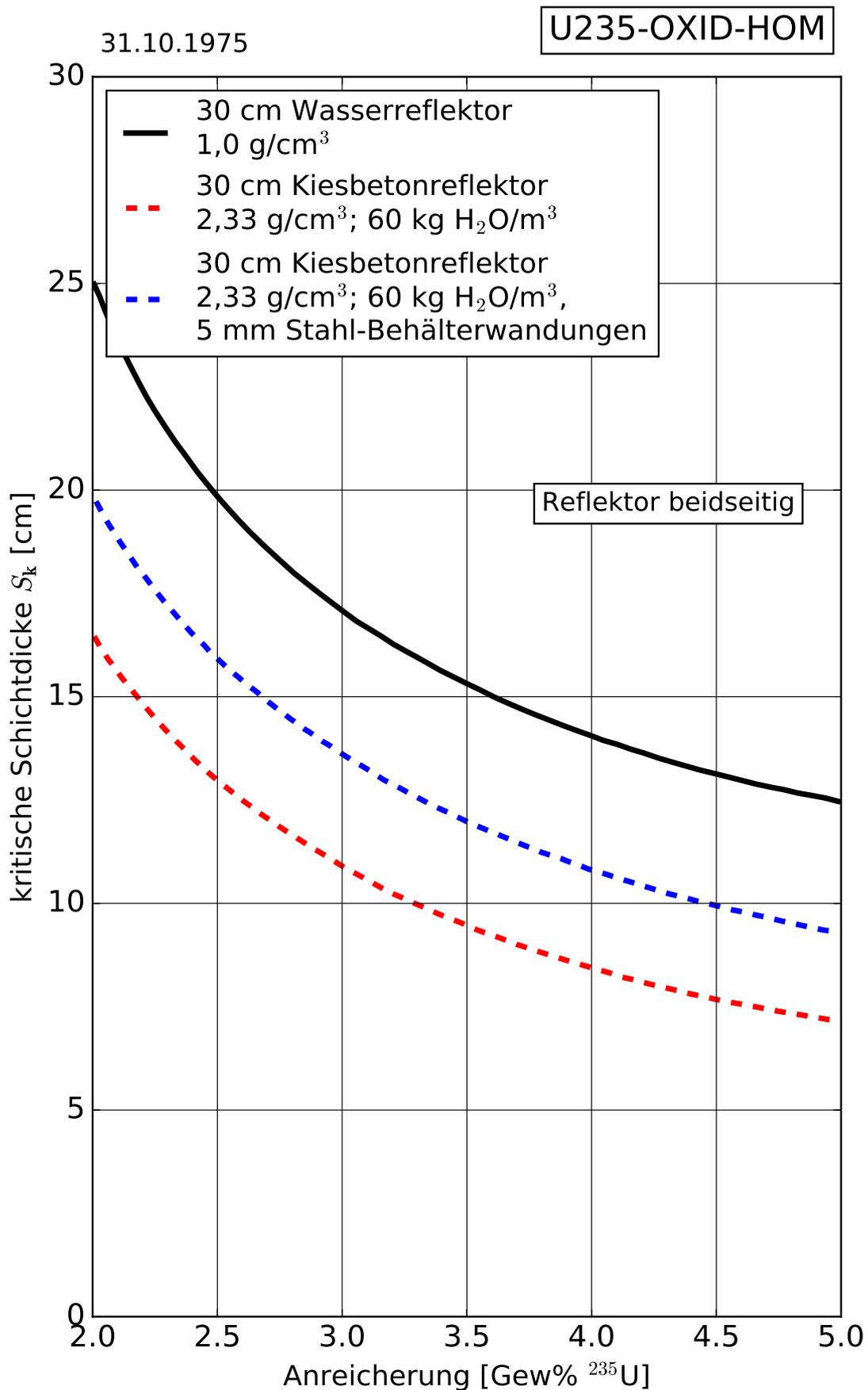


Abb. 1.B.23 Kleinste kritische Schichtdicke von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen mit Wasser- bzw. Kiesbeton-Reflektor

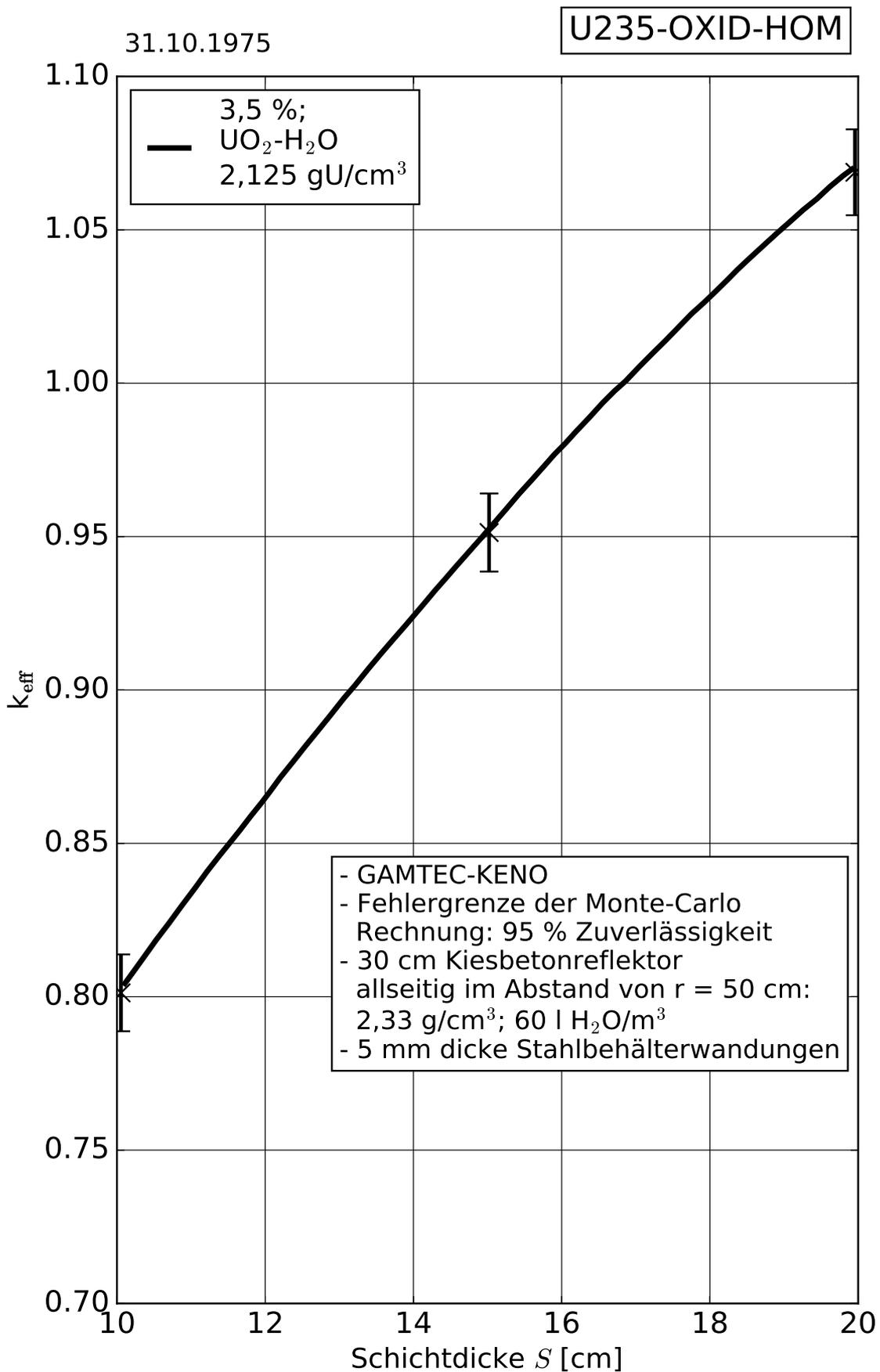


Abb. 1.B.24.a Multiplikationsfaktoren von $3 \times 3 \text{ m}^2$ großen Urandioxid-Flachbehältern in Abhängigkeit der Schichtdicke bei nicht unmittelbar anschließenden Betonreflektoren

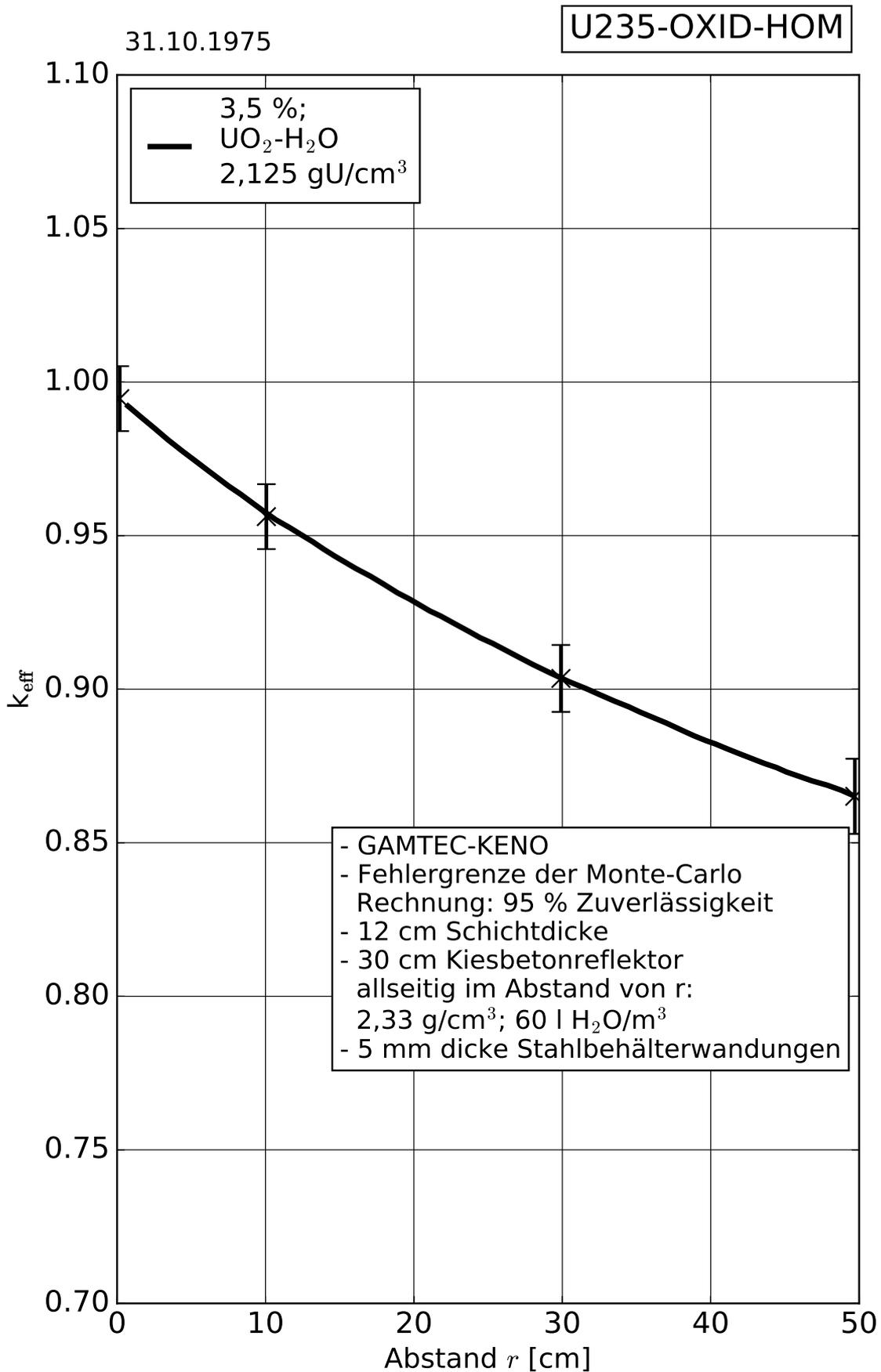


Abb. 1.B.24.b Multiplikationsfaktoren von $3 \times 3 \text{ m}^2$ großen Urandioxid-Flachbehältern in Abhängigkeit des Abstands bei nicht unmittelbar anschließenden Betonreflektoren

05.12.1975

U235-OXID-HOM

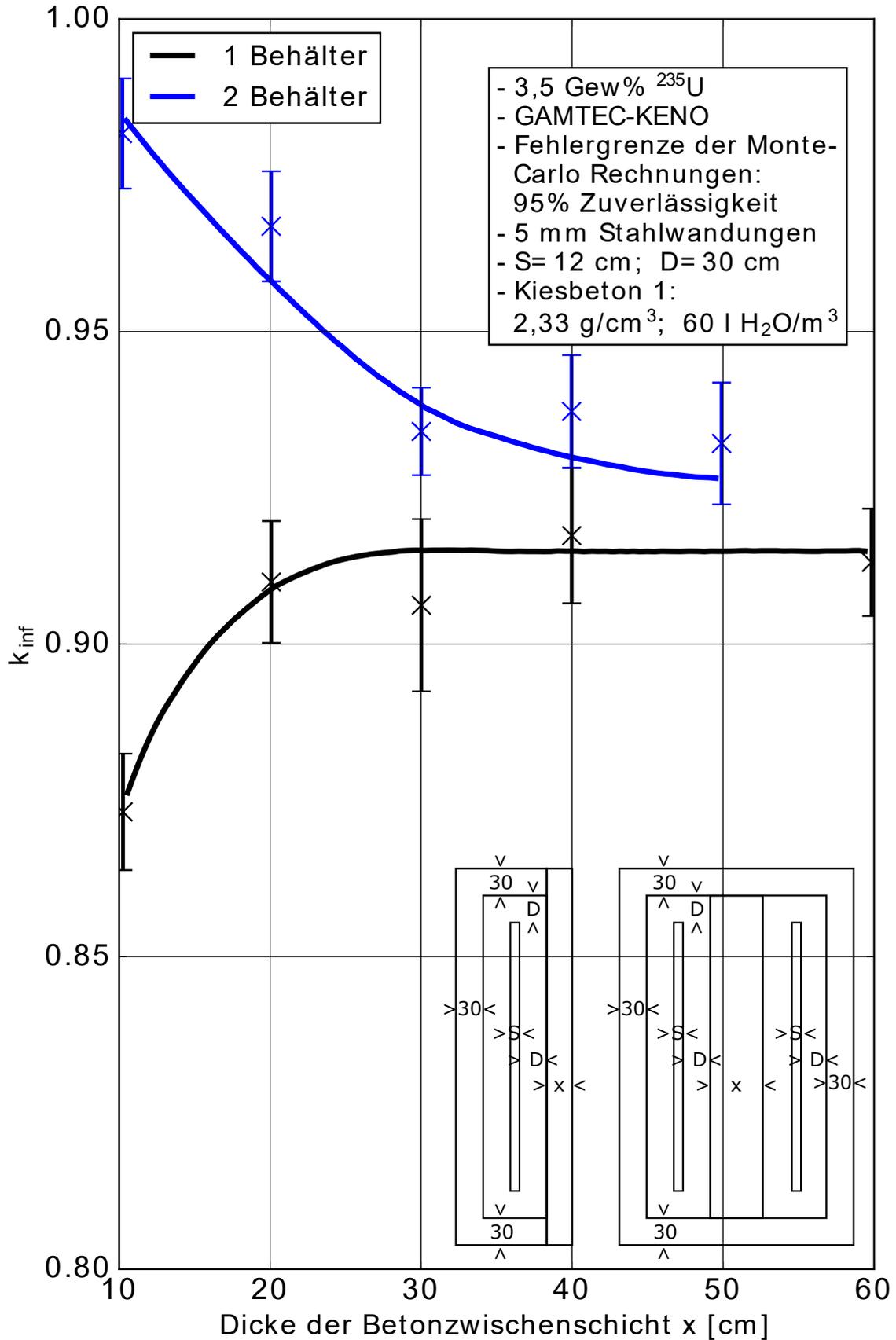


Abb. 1.B.25.a Neutronenwechselwirkung zwischen zwei betonabgeschirmten $3 \times 3\text{ m}^2$ großen Uranoxyd-Flachbehältern: Kiesbeton 1

05.12.1975

U235-OXID-HOM

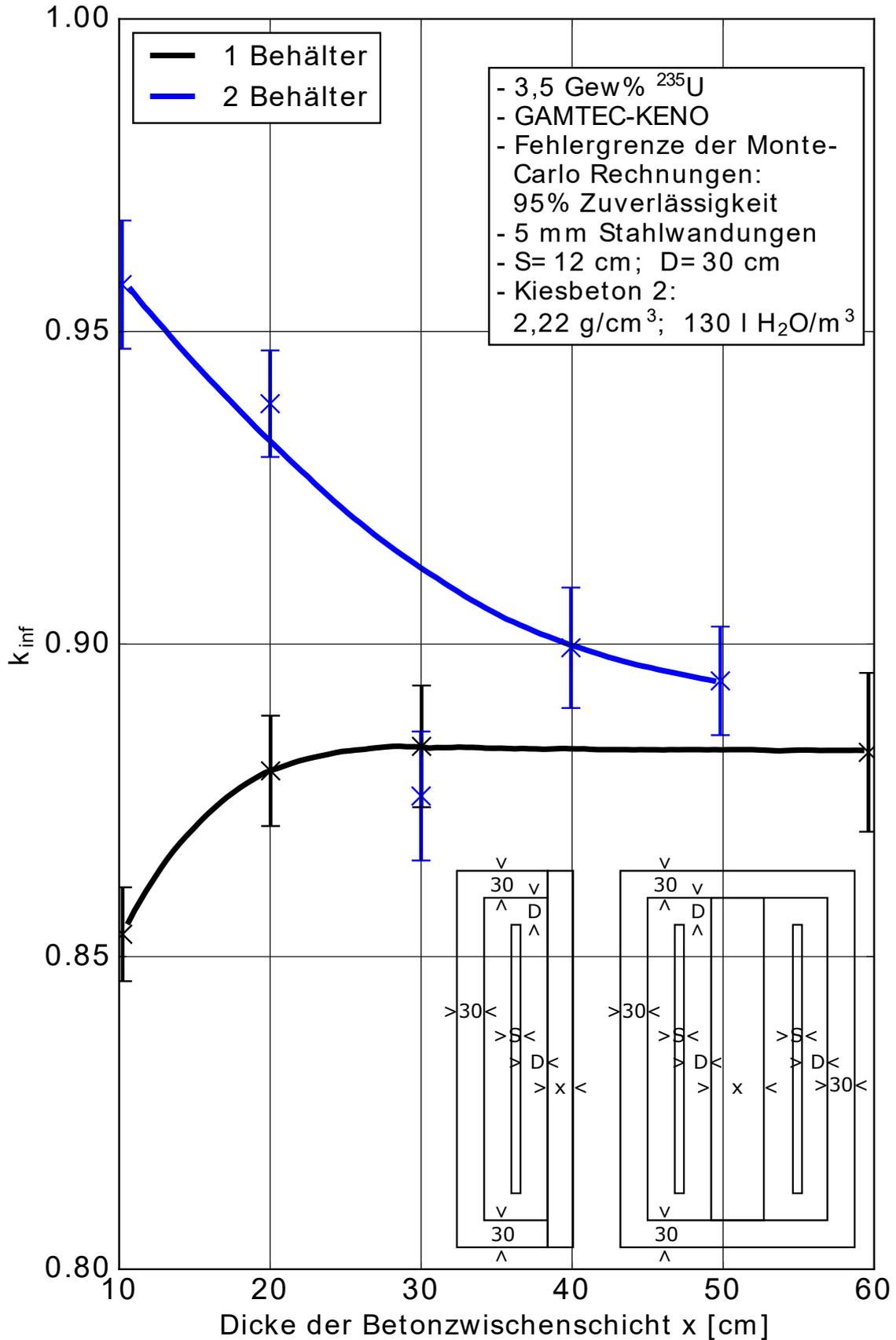


Abb. 1.B.25.b Neutronenwechselwirkung zwischen zwei betonabgeschirmten $3 \times 3 \text{ m}^2$ großen Uranoxyd-Flachbehältern: Kiesbeton 2

12.12.1975

U235-OXID-HOM

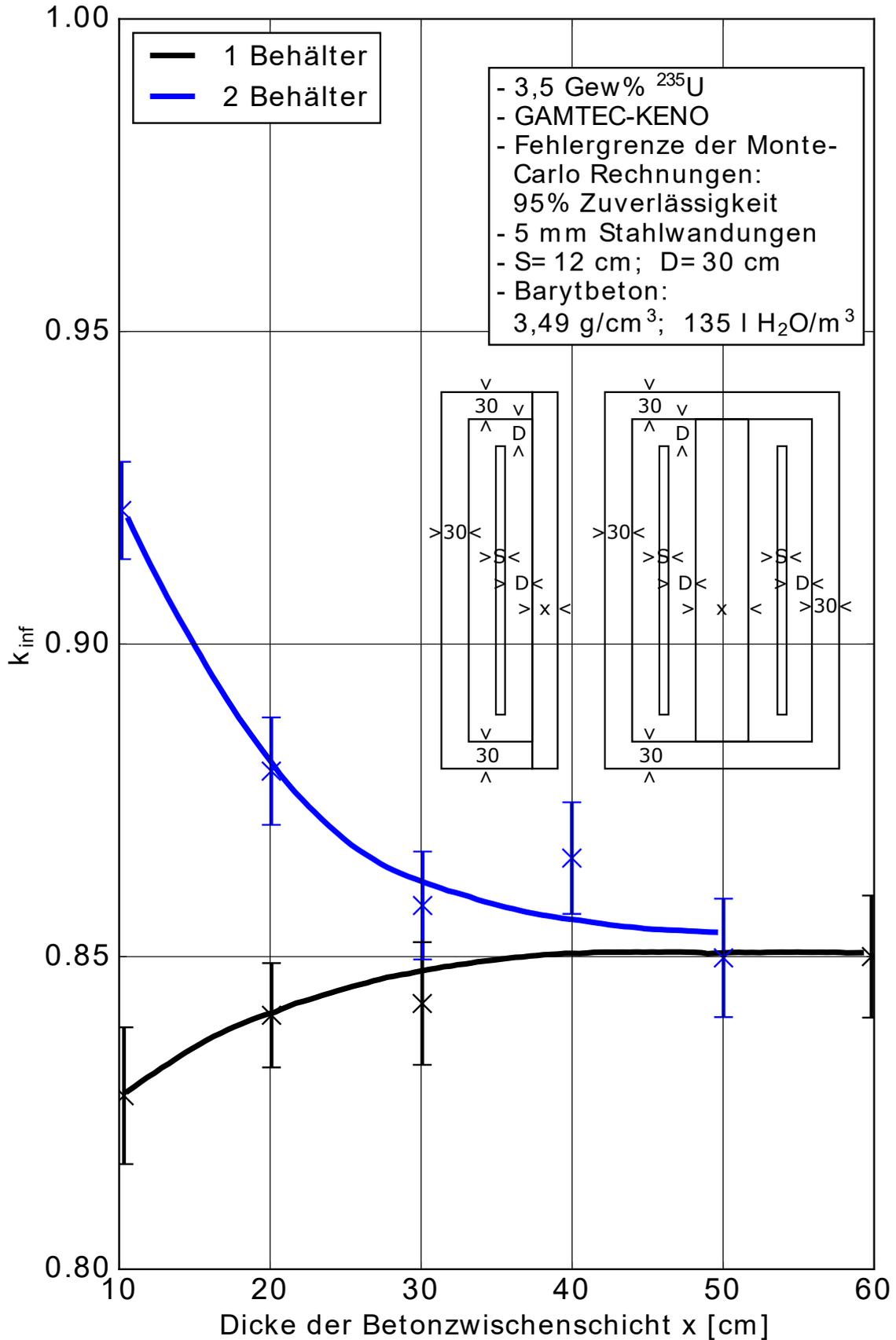


Abb. 1.B.25.c Neutronenwechselwirkung zwischen zwei betonabgeschirmten 3x3 m² großen Uranoxyd-Flachbehältern: Barytbeton

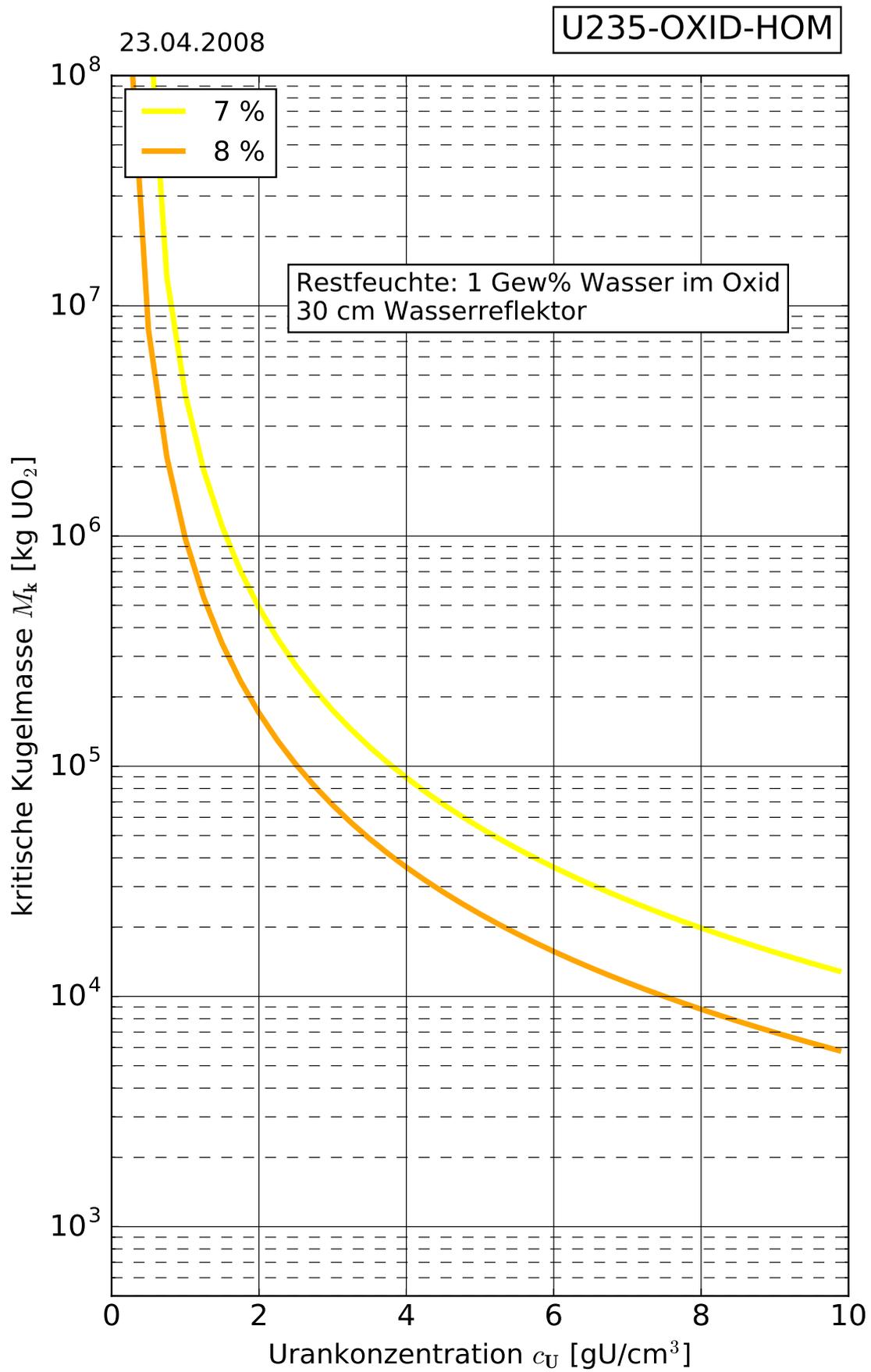


Abb. 1.B.31.a Kritische Kugelmasse von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 1 % Restfeuchte

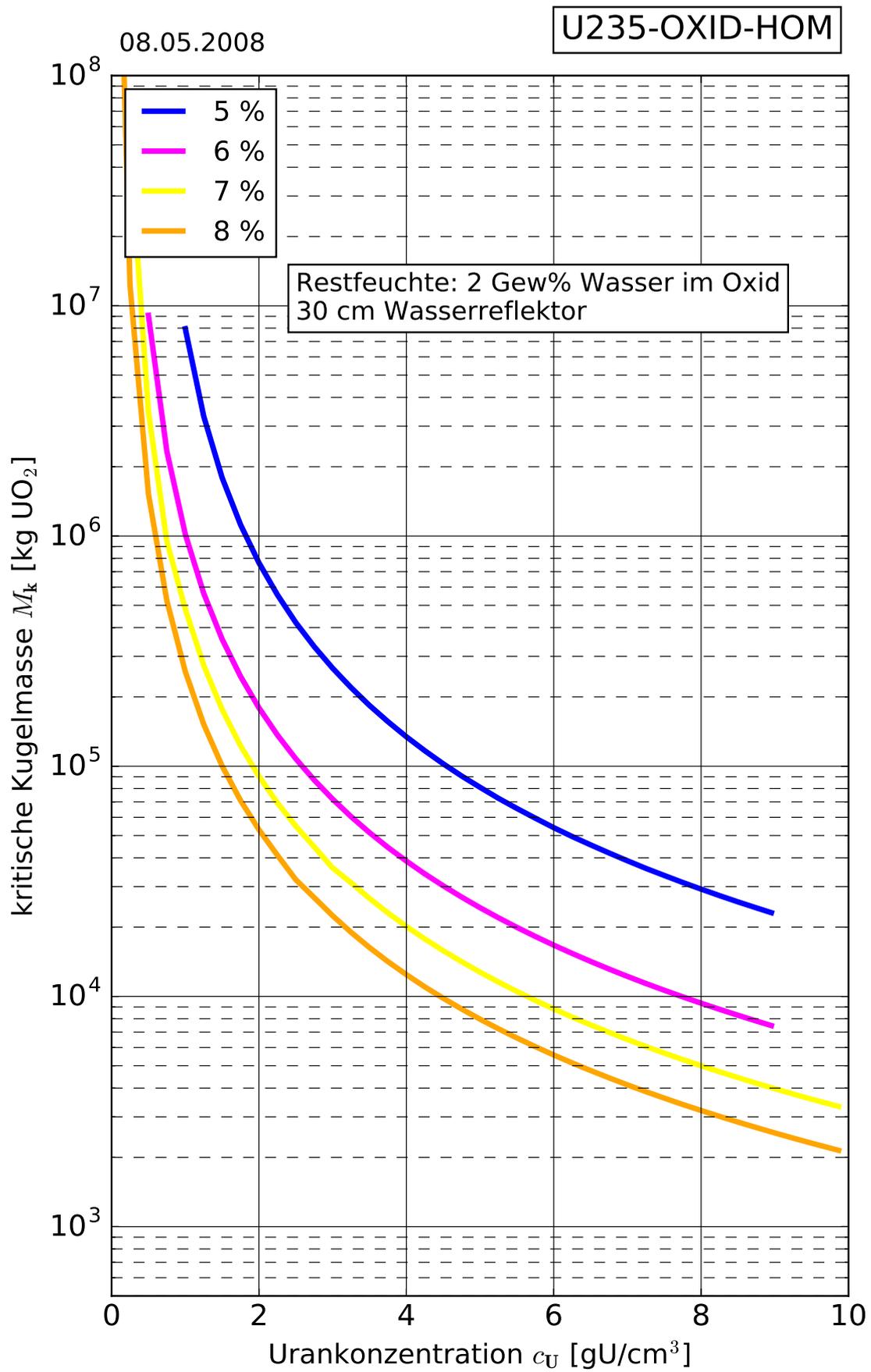


Abb. 1.B.31.b Kritische Kugelmasse von homogenen UO₂-Wasser-Systemen mit 2 % Restfeuchte

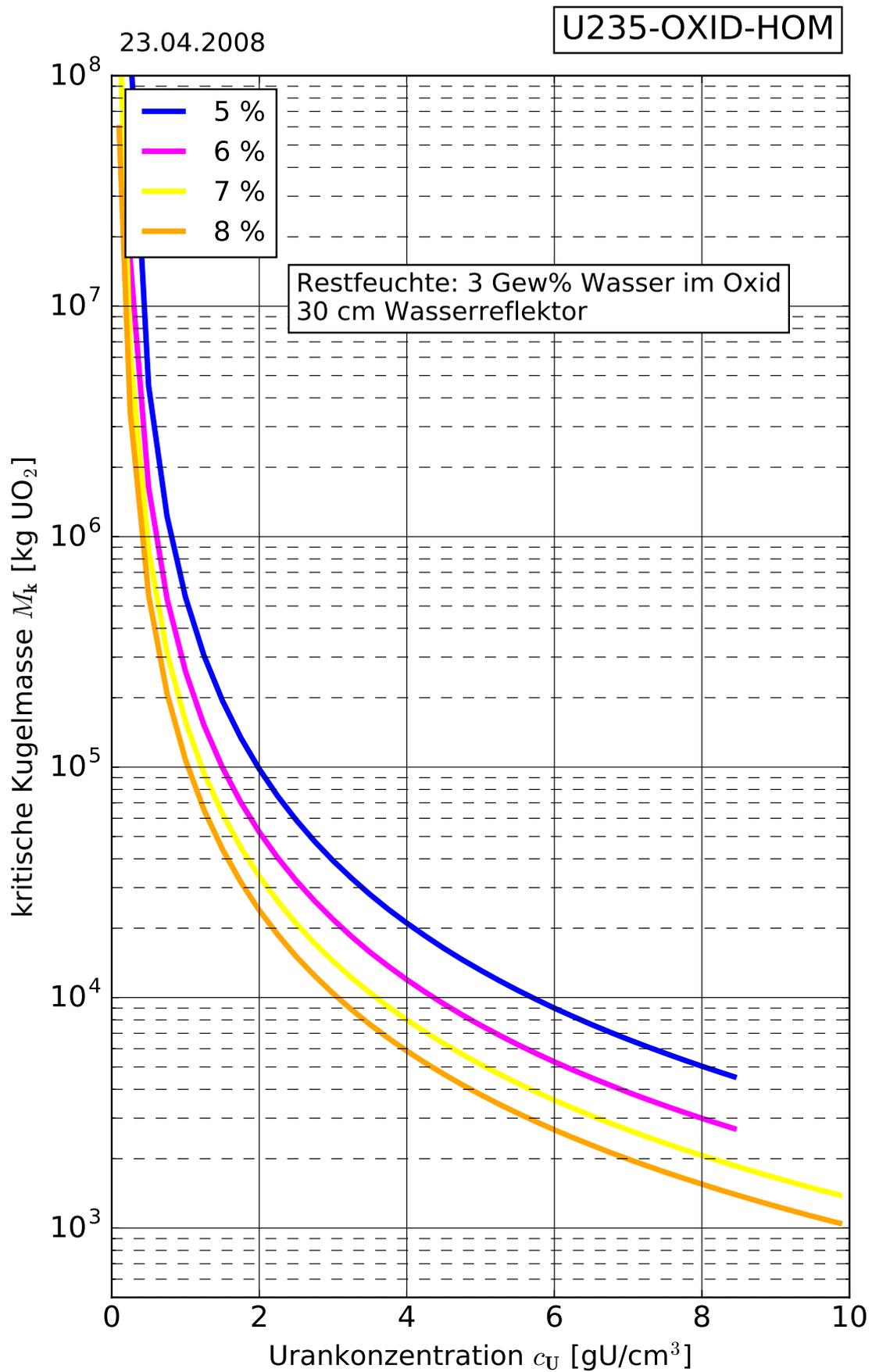


Abb. 1.B.31.c Kritische Kugelmasse von homogenen UO₂-Wasser-Systemen mit 3 % Restfeuchte

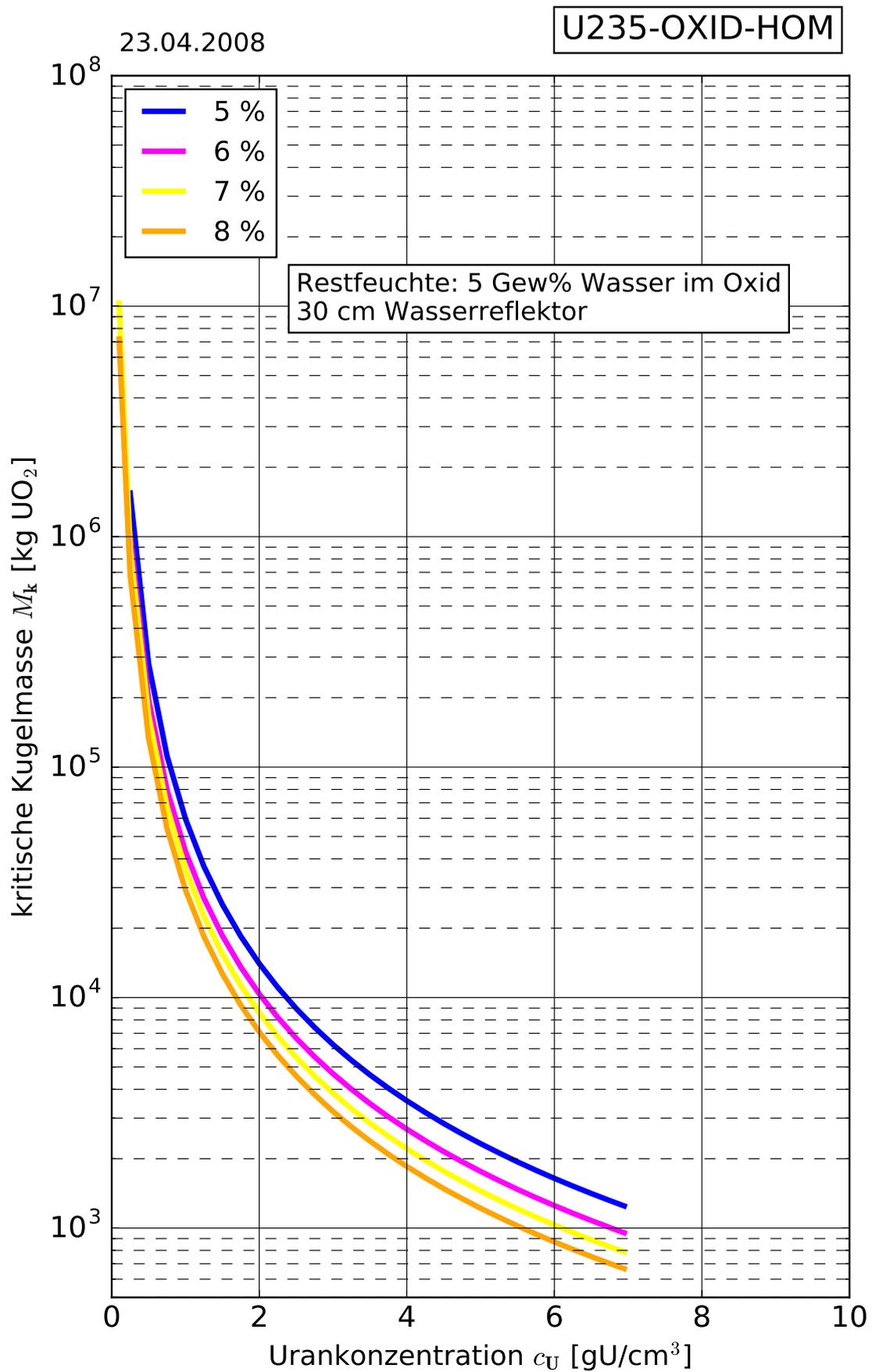


Abb. 1.B.31.d Kritische Kugelmasse von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 5 % Restfeuchte

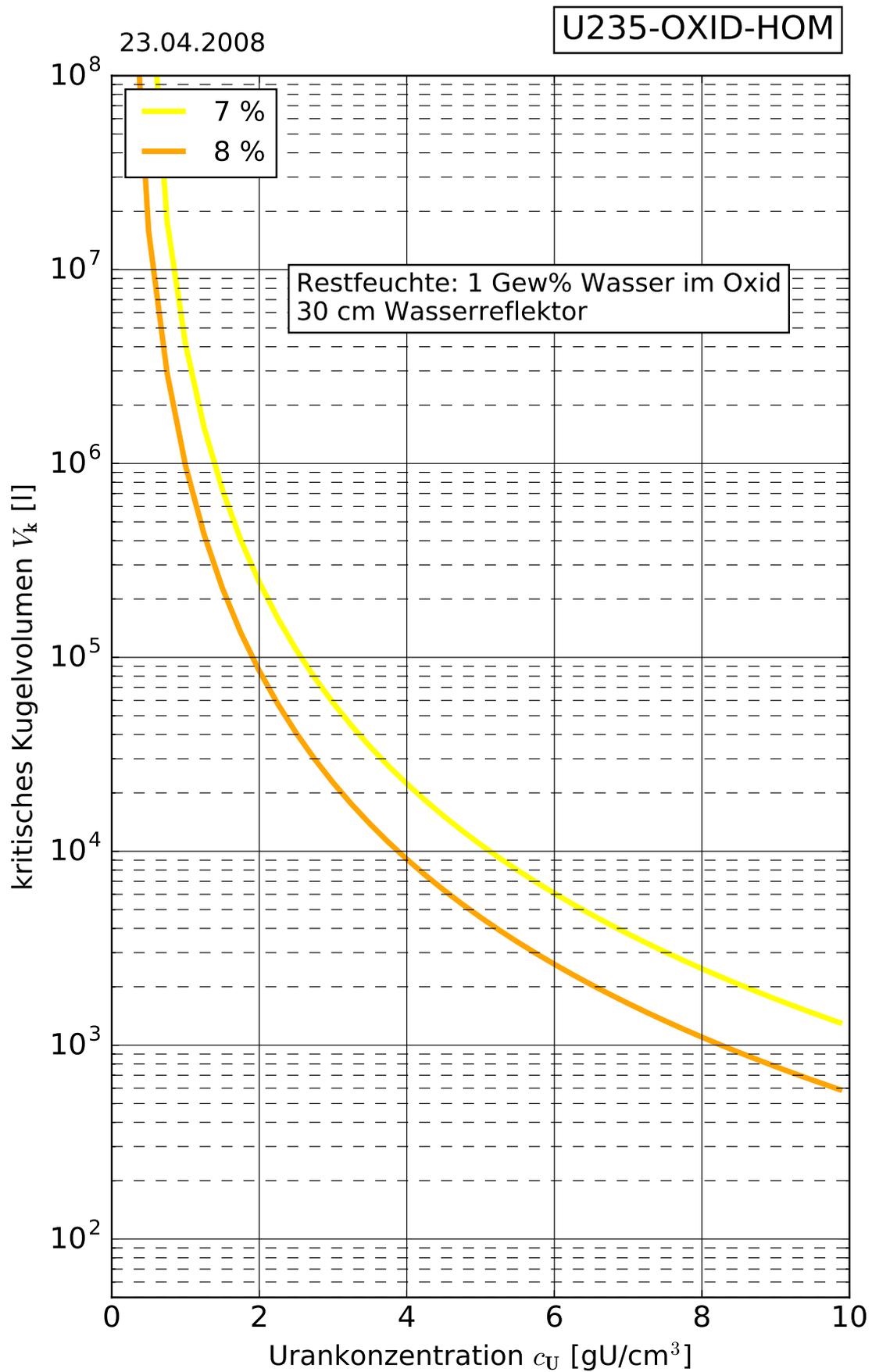


Abb. 1.B.32.a Kritisches Kugelvolumen von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 1% Restfeuchte

25.01.2008

U235-OXID-HOM

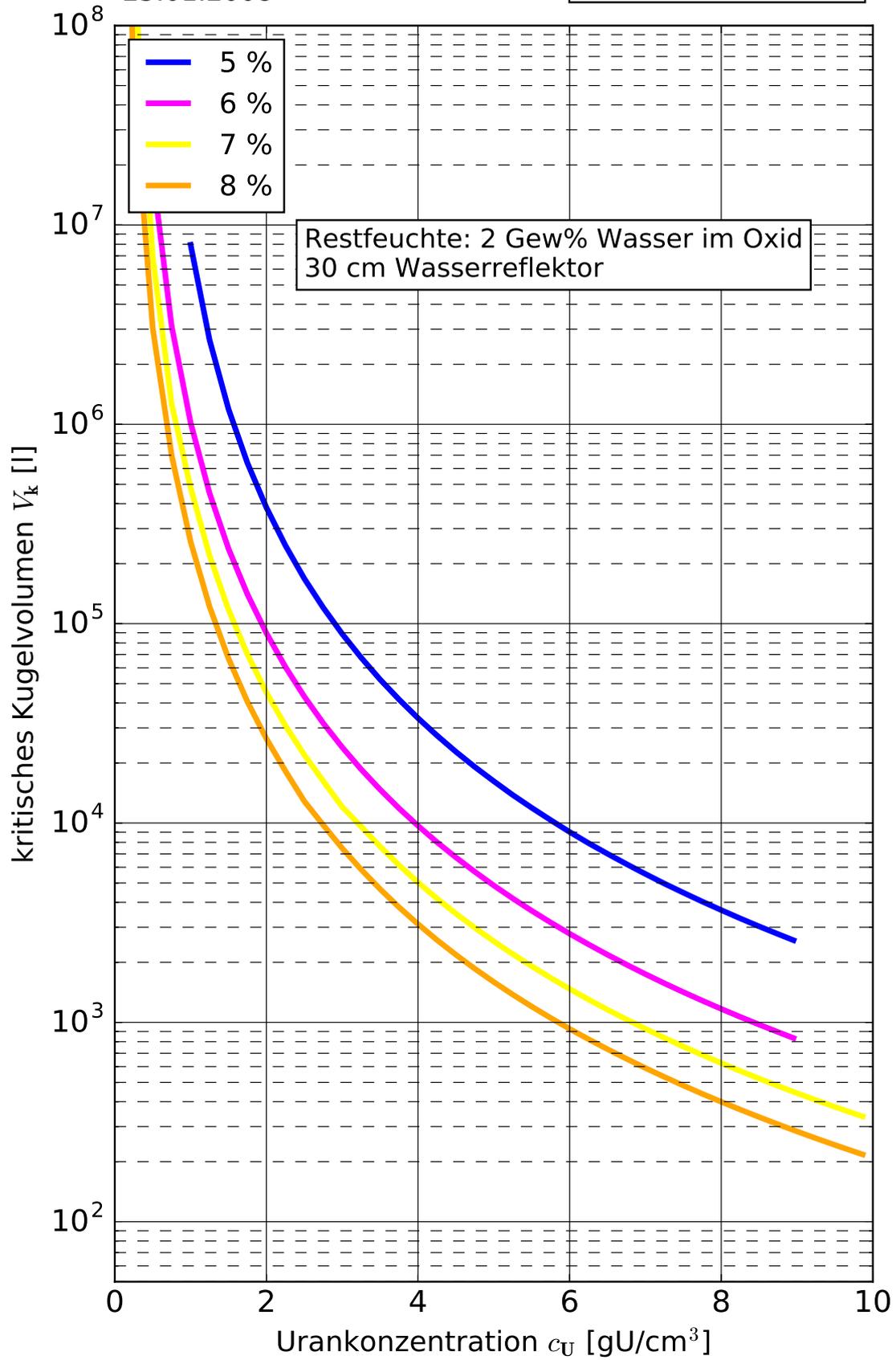


Abb. 1.B.32.b Kritisches Kugelvolumen von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 2% Restfeuchte

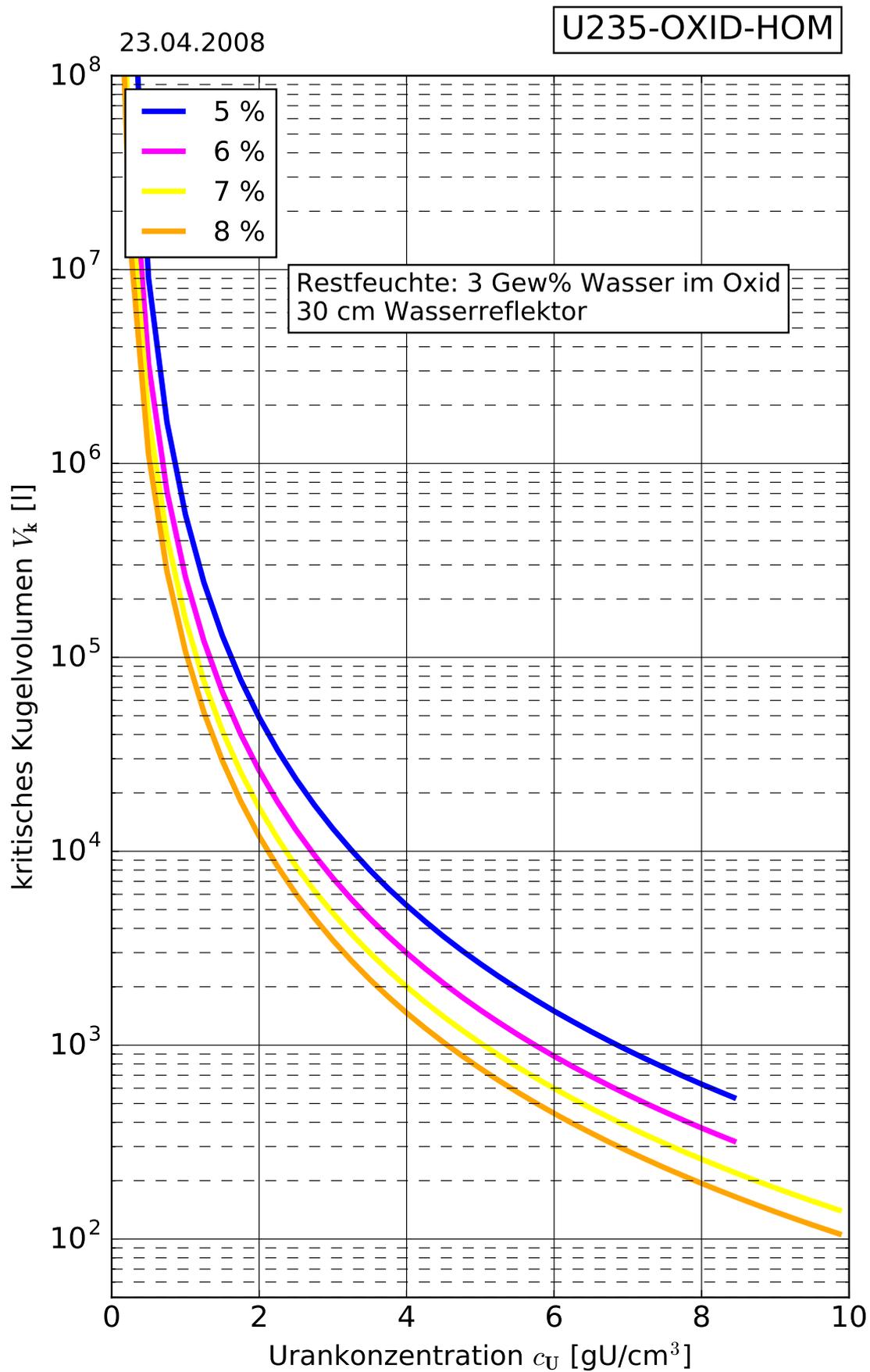


Abb. 1.B.32.c Kritisches Kugelvolumen von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 3% Restfeuchte

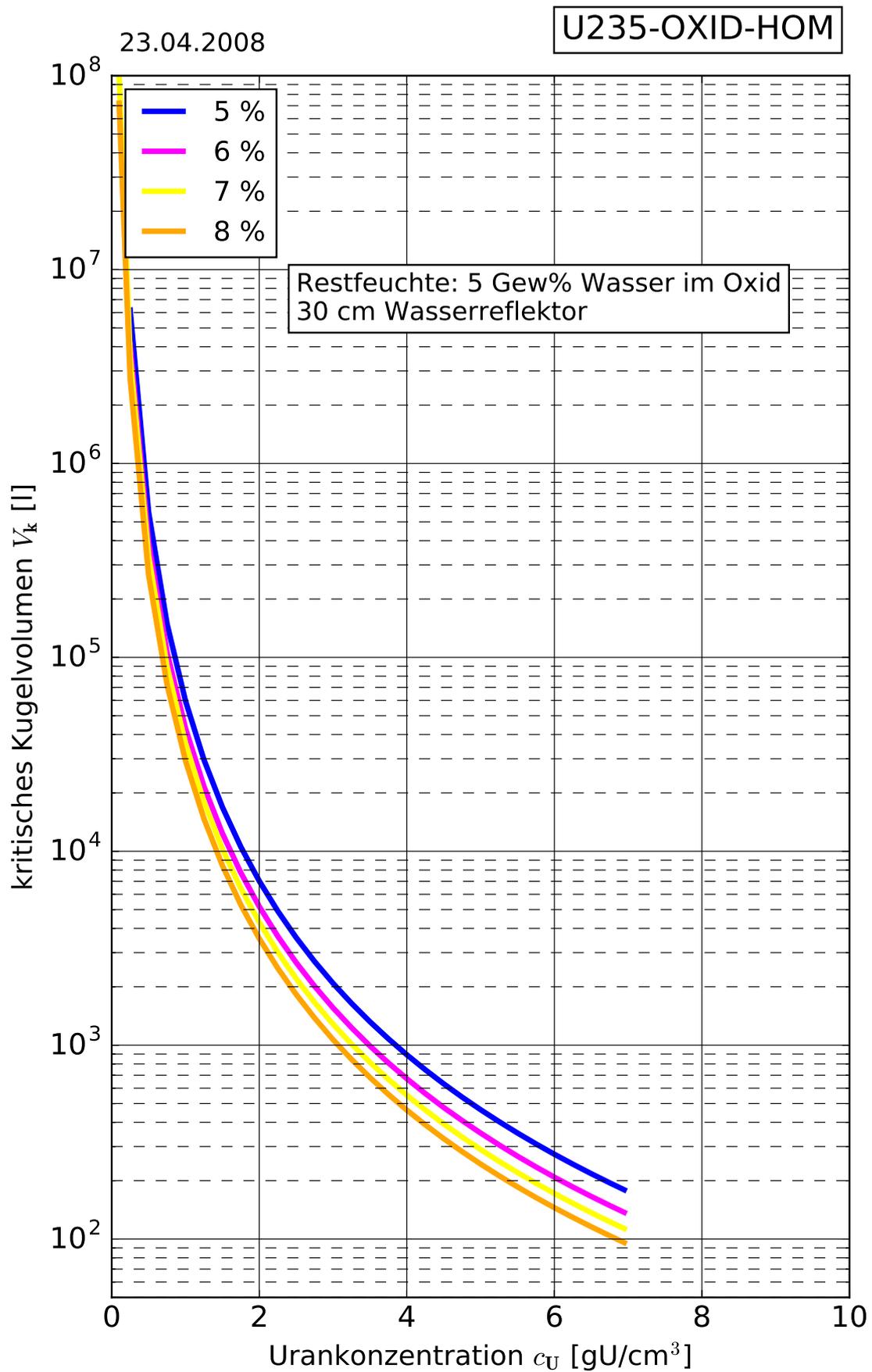


Abb. 1.B.32.d Kritisches Kugelvolumen von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 5% Restfeuchte

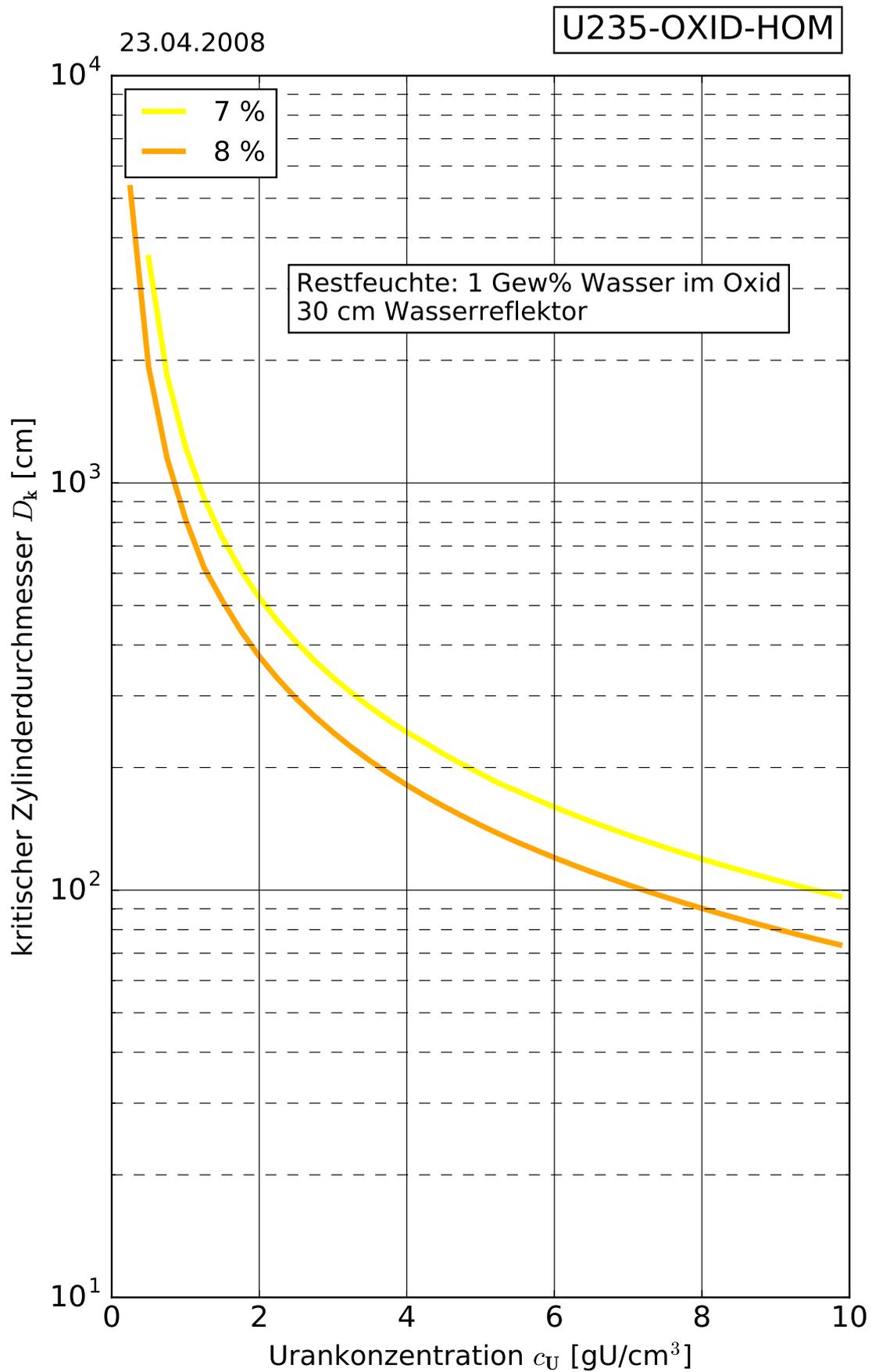


Abb. 1.B.33.a Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 1% Restfeuchte

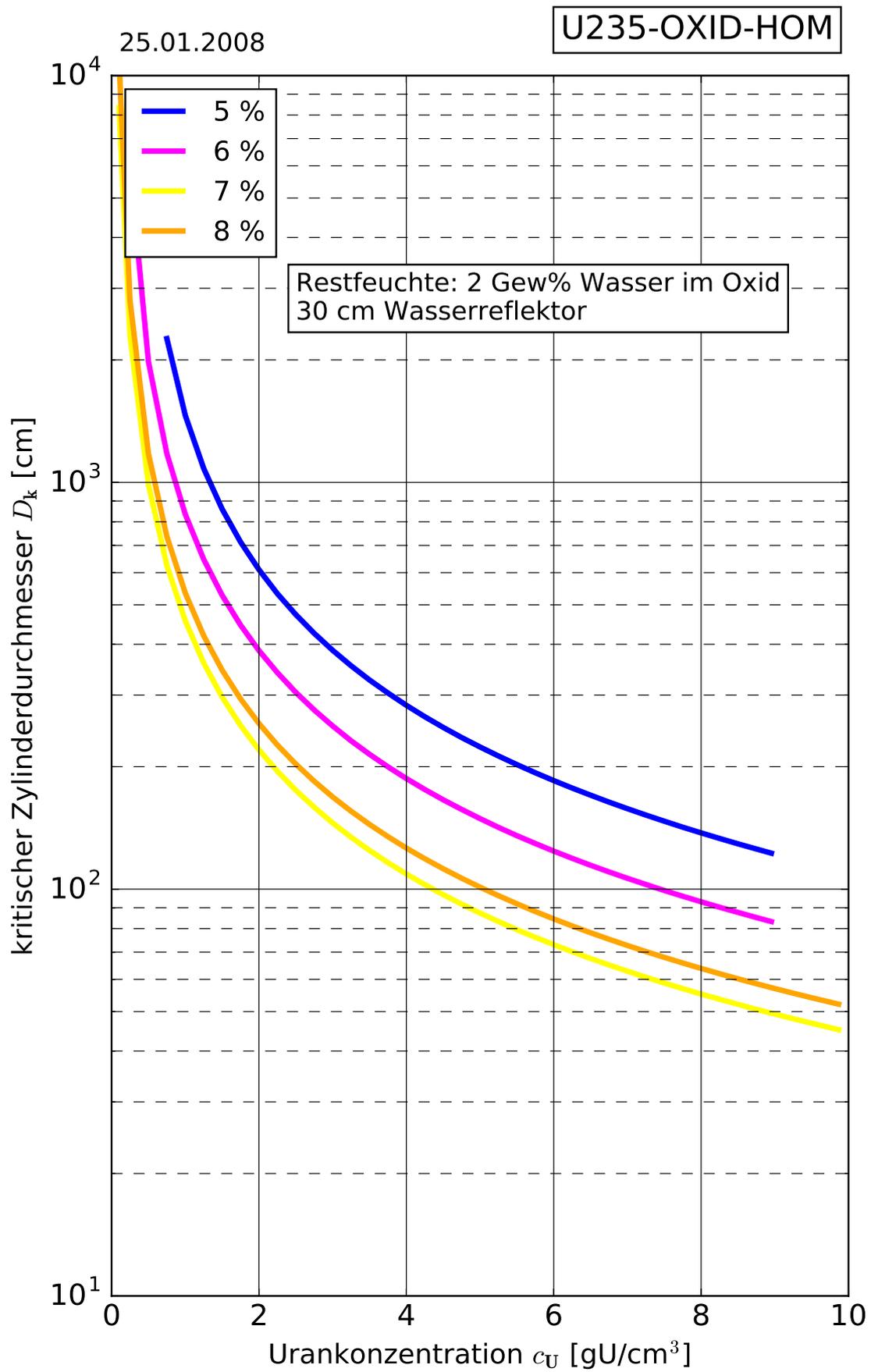


Abb. 1.B.33.b Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 2% Restfeuchte

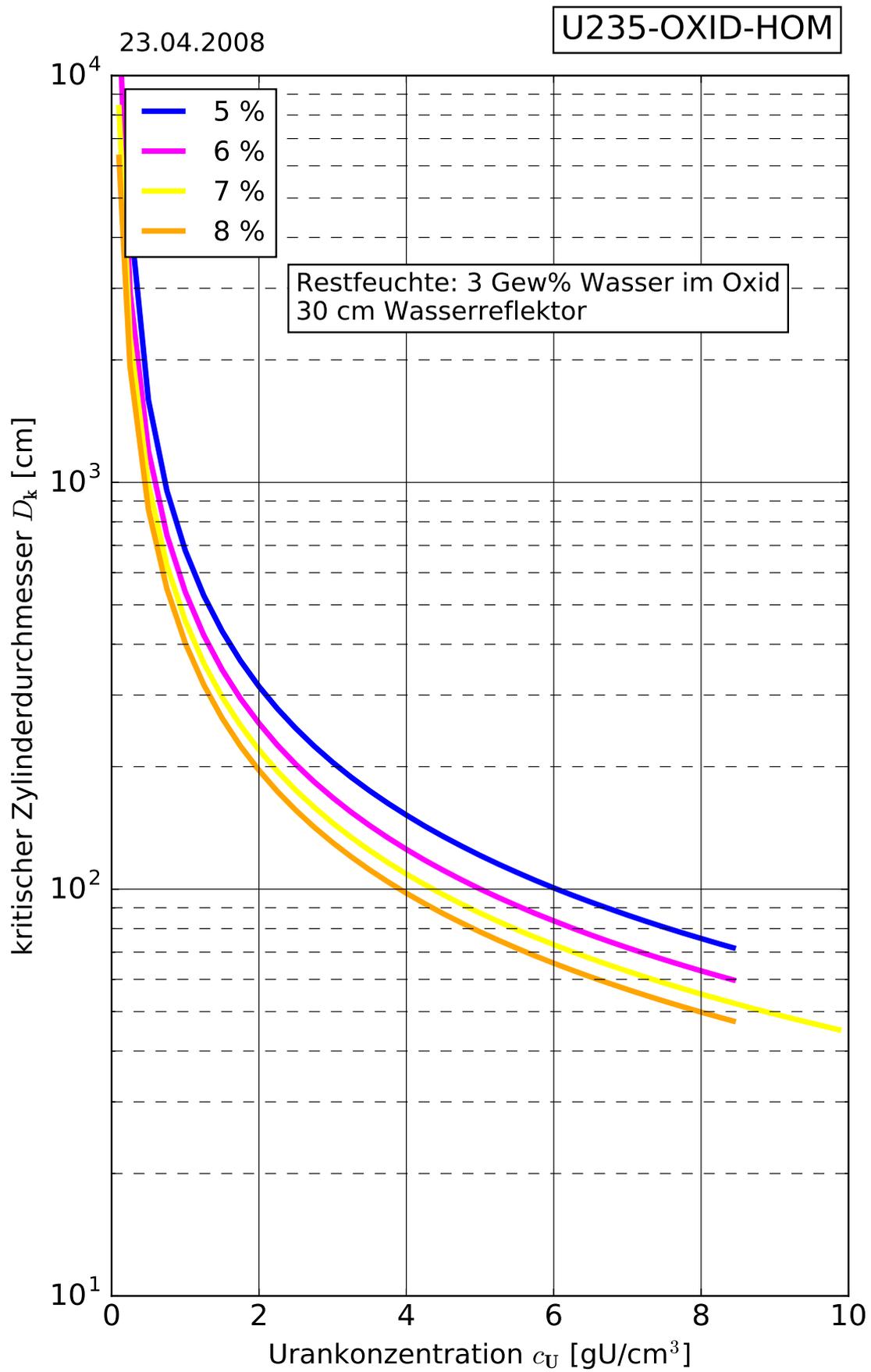


Abb. 1.B.33.c Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 3% Restfeuchte

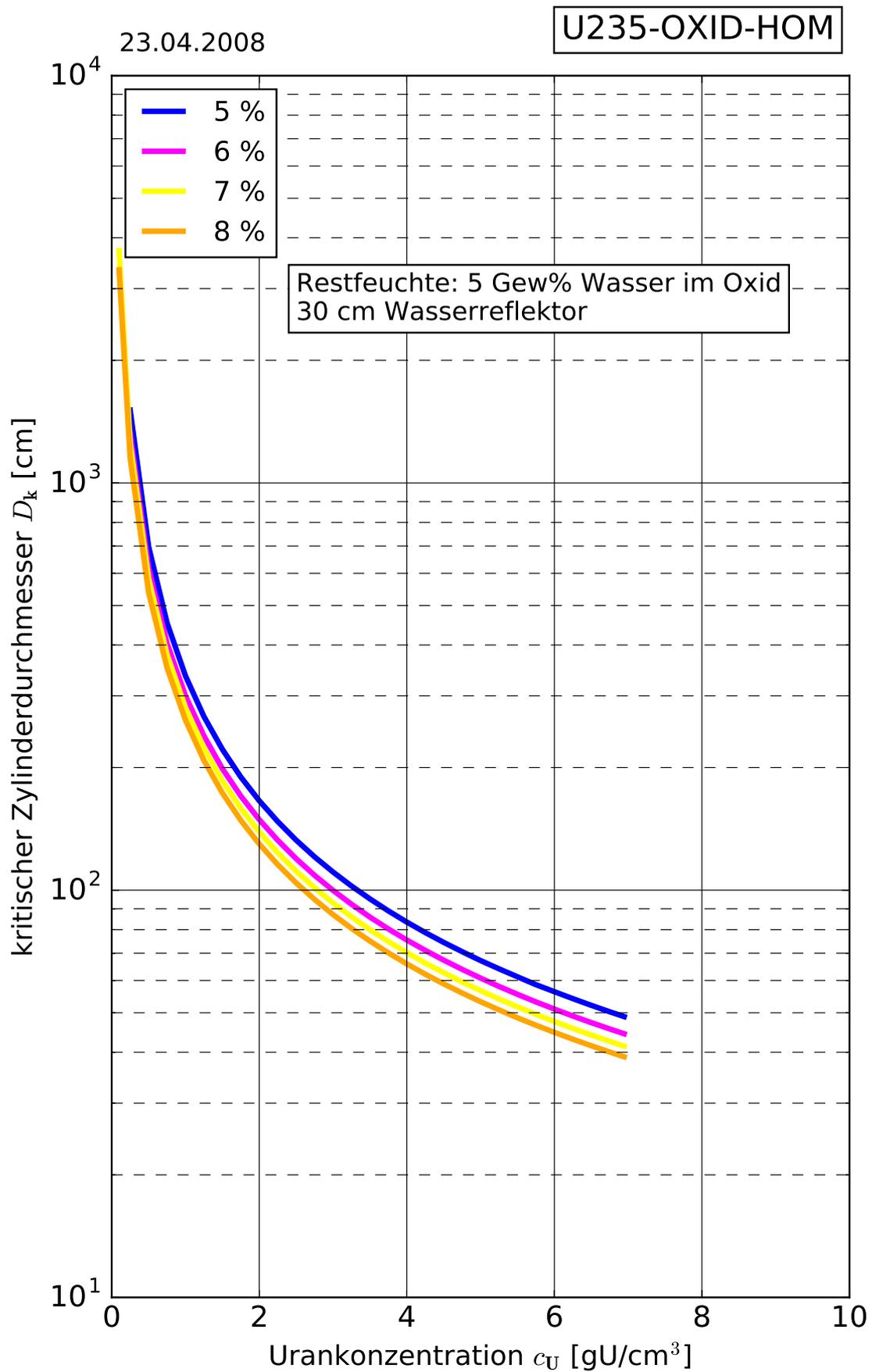


Abb. 1.B.33.d Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 5% Restfeuchte

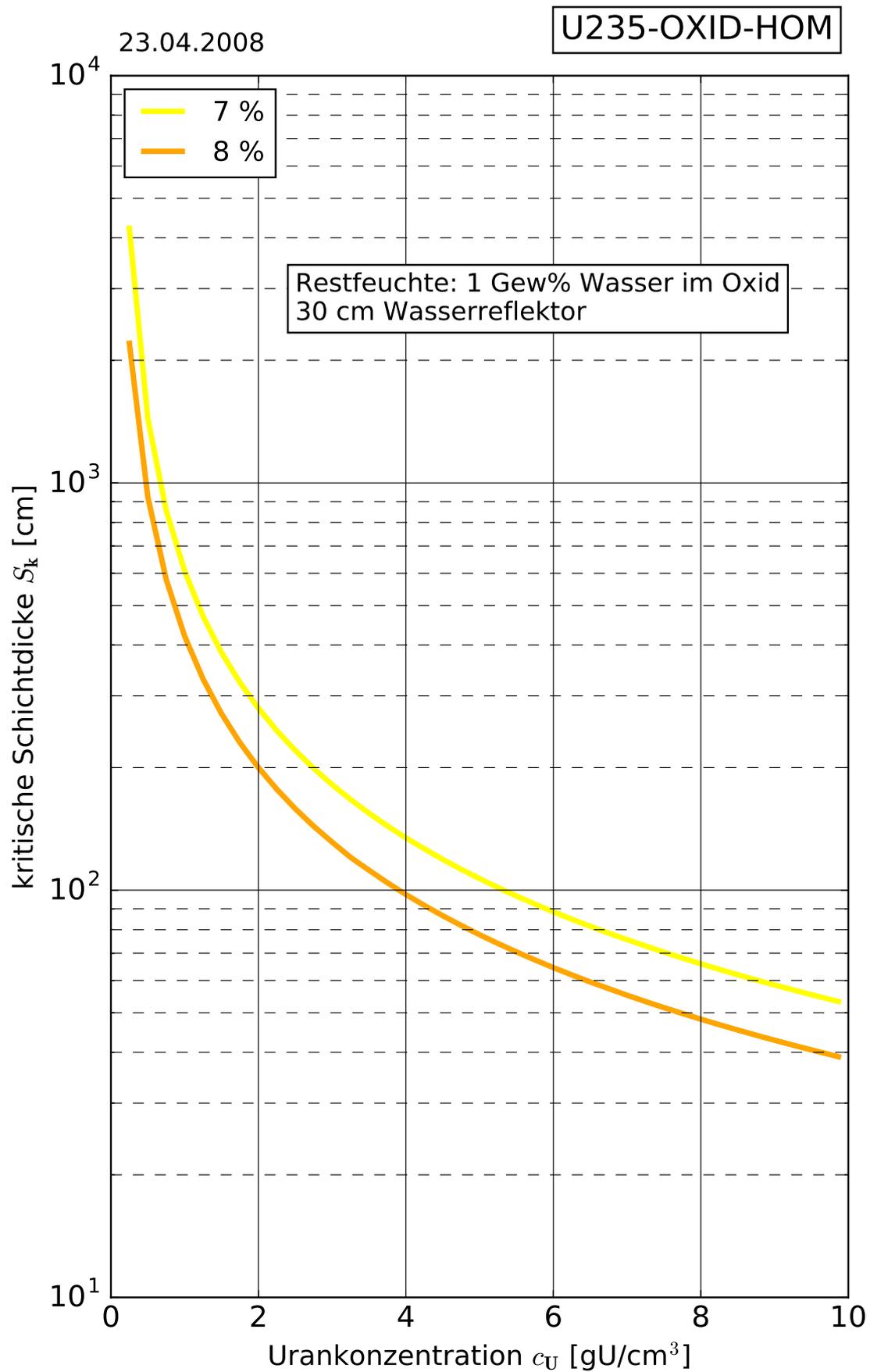


Abb. 1.B.34.a Kritische Schichtdicke von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 1 % Restfeuchte

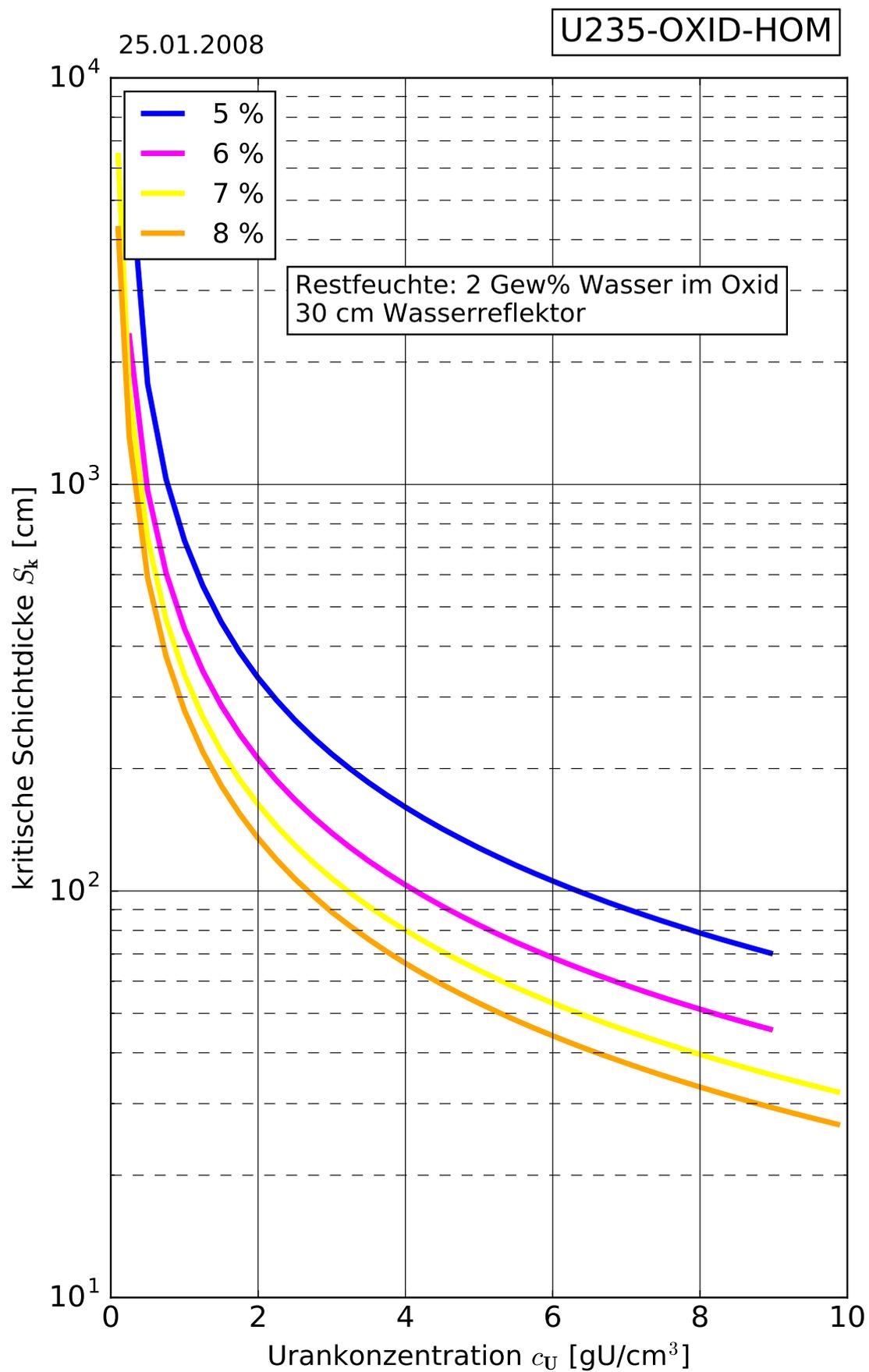


Abb. 1.B.34.b Kritische Schichtdicke von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 2 % Restfeuchte

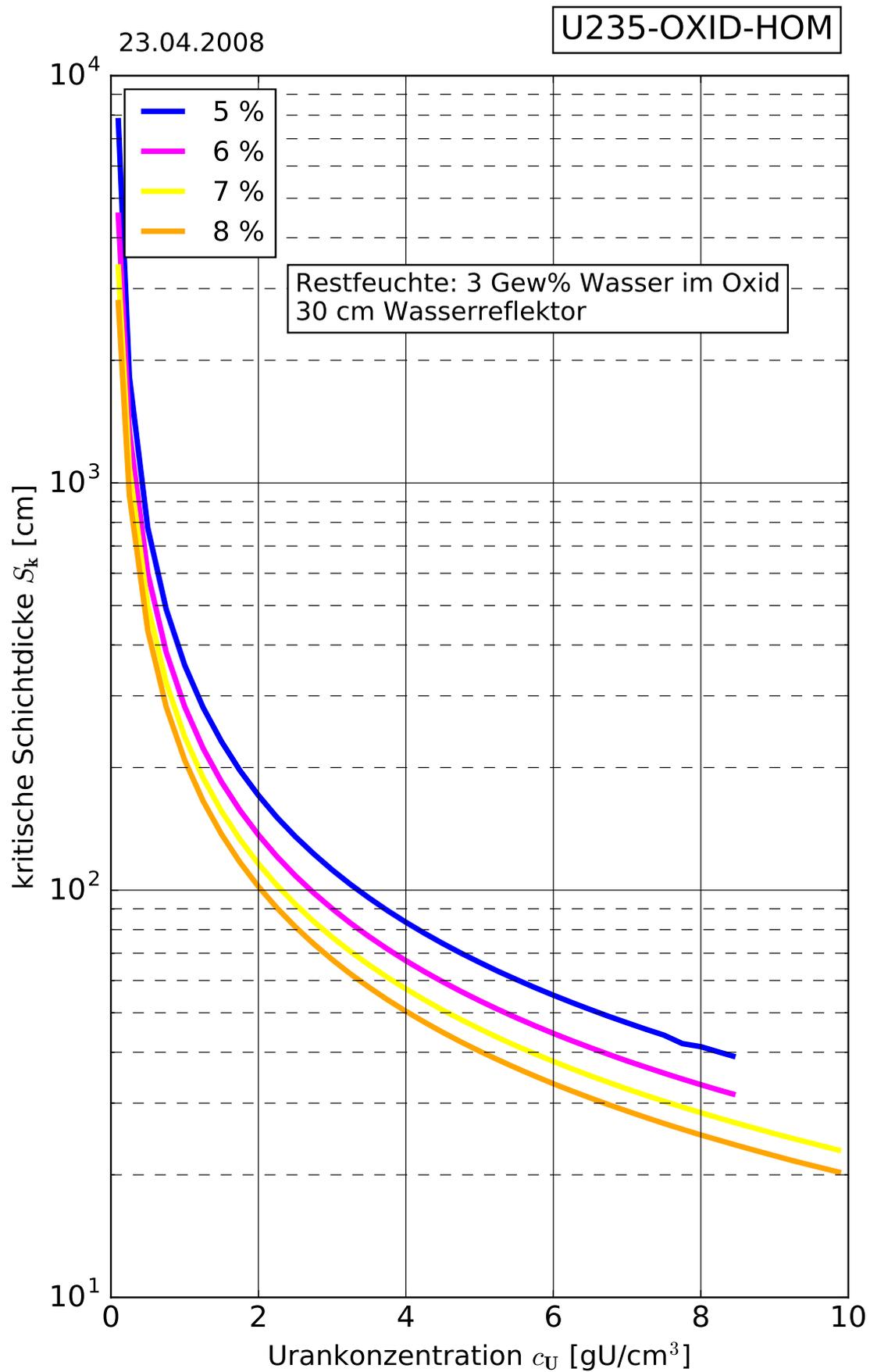


Abb. 1.B.34.c Kritische Schichtdicke von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 3 % Restfeuchte

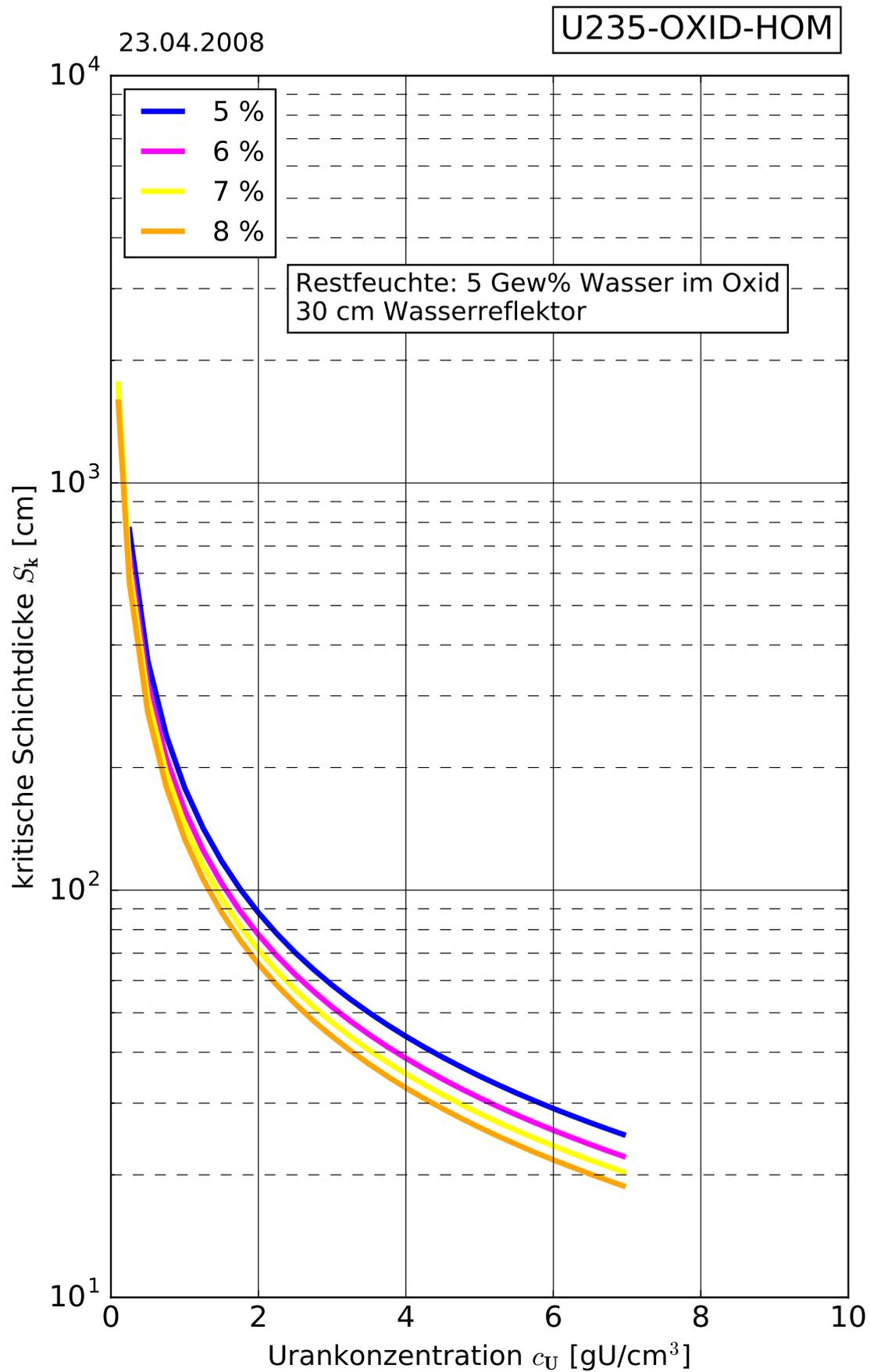


Abb. 1.B.34.d Kritische Schichtdicke von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 5 % Restfeuchte

1.C Homogene Uranoxifluorid-Wasser-Systeme

Die folgenden Tabellen und Kurvenblätter enthalten kritische Werte für homogene Uranoxifluorid-Wasser-Systeme (UO_2F_2) verschiedener ^{235}U -Anreicherungen (2, 3, 4, 5, 6, 10, 30, 50 und 100 Gew%). Diese ist jeweils als Parameter für die entsprechende Kurve angegeben. Sämtliche kritische Werte gelten für voll wasserreflektierte Systeme.

Uranoxifluorid, auch bekannt unter dem Namen Uranylfluorid, ist ein Zwischenprodukt bei der Konversion von Uranhexafluorid UF_6 zu Urandioxid UO_2 oder Uranmetall. Auch in Störfallbetrachtungen beim Umgang mit UF_6 , insbesondere bei dessen unkontrollierter Freisetzung, spielt Uranoxifluorid eine bedeutende Rolle.

Uranoxifluorid entsteht bei Kontakt von UF_6 mit Wasser oder Wasserdampf (auch Luftfeuchtigkeit) in einer exothermen Reaktion. Die molare Masse beträgt 307,88 g/mol bei einer ^{235}U -Anreicherung von 5 Gew% bzw. 308,02 g/mol im Fall von Natururan. Seine maximale theoretische Trockendichte beträgt 6,37 g/cm³ /CAR 68/, was einer Uranpartialdichte von 4,96 gU/cm³ entspricht. Im stabilen hydrierten Zustand als $\text{UO}_2\text{F}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ besitzt Uranoxifluorid eine Dichte von 4,76 g/cm³, was einer Uranpartialdichte von 3,3 gU/cm³ entspricht; diese hydrierte Form besitzt das Moderationsverhältnis $H/U = 4$. Im Moderationsbereich $0 < H/U < 4$ existieren Gemische von Kristallen unterschiedlicher Hydrierung.

Trockenes Uranoxifluorid ist hygroskopisch und an Luft nicht brennbar. Auch die hydrierte Form absorbiert volumenadditiv (s. u.) weitere Feuchtigkeit und beginnt oberhalb von $H/U \approx 16$ zu zerfließen. Mit bis zu 64,4 g pro 100 g Wasser bei 20 °C ist es sehr gut wasserlöslich /LID 10/. Die maximale Löslichkeit seiner dehydrierten Form in Wasser unter Raumbedingungen beträgt 1,54 g/cm³, was einer Urankonzentration von 1,19 gU/cm³ entspricht. Das Moderationsverhältnis am Punkt maximaler Löslichkeit beträgt $H/U = 17,8$.

Es werden zwei unterschiedliche Datensätze wiedergegeben. Die historischen Berechnungen für ^{235}U -Anreicherungen von 2, 3, 4, 5, 10, 30, 50 und 100 Gew% stammen von 1974 und sind in den Abb. 1.C.1.a bis Abb. 1.C.4.a (jeweils #.#.#.a) und Abb. 1.C.6 bis Abb. 1.C.8 gezeigt. Die Rechnungen erfolgten mit dem Programmsystem HAMMER /SUI 67/ in 4 Energiegruppen. Diese Rechenmethode erbrachte bei der Nachrechnung von Experimenten /JOH 64/, /LÉC 73/, /RAF 72/ durchwegs gute Resultate (Δk_{eff} meist $< 0,01$ zur sicheren Seite gegenüber dem Experiment). Einige Parallelrechnungen mit GAMTEX 16-Gruppenquerschnitten /CAR 65/ und dem eindimensionalen Transportcode DTF /LAT 65/ bestätigen die experimen-

tellen Werte ebenfalls sehr gut. Bei den Berechnungen wurde der Fluoranteil durch Sauerstoff ersetzt, was einen zu vernachlässigenden Fehler bedeutet, wie die Nachrechnungen der Experimente gezeigt haben.

Hinweis: Für die Berechnung dieser historischen Datenblätter wurde die Methode der Restwasserauffüllung als Dichterelation verwendet. Sie führt im Falle des wasserlöslichen Uranoxifluorids im Vergleich mit anderen Quellen zu nichtkonservativen Werten und wurde deshalb für neuere Rechnungen durch die Methode der additiven molaren Volumina ersetzt. Dies ist u. a. auch gerechtfertigt durch die Tatsache, dass die Restwasserauffüllung der Physik und Chemie des Lösungsvorgangs von Uranoxifluorid in Wasser nicht gerecht wird. Insbesondere bei höheren Urankonzentrationen kommt dieser Effekt signifikant zum Tragen. Vertiefende Informationen sind in /KIL 09/ beschrieben.

Die neueren Datenblätter (Abb. 1.C.1.b bis Abb. 1.C.4.b (jeweils #.#.#.b) für ^{235}U -Anreicherungen von 2, 3, 4, 5 und 6 Gew% wurden 2008 mit aktuellen Methoden und Rechencodes nachgerechnet: Der Zusammenhang zwischen Urankonzentration c_U und zugehörigem Moderationsverhältnis H/U wurde mit Hilfe einer auf dem Prinzip additiver molarer Volumina basierenden empirischen Dichterelation errechnet /JOR 92/. Aufgrund eines physikalischen Phasenübergangs im Kristallgitter bei $H/U = 4$ ist diese Relation zweigeteilt. Mit entsprechenden Zahlenwerten für UO_2F_2 lautet der Zusammenhang:

$$\rho_U \left(\frac{H}{U} \right) = \frac{238}{\frac{344,057}{4,76} + \left(\frac{H}{U} - 4 \right) \cdot \frac{18,016}{2,0,9982}}, \quad \frac{H}{U} \geq 4 \quad (1.1)$$

$$\rho_U \left(\frac{H}{U} \right) = 4,96 - 0,32 \cdot \frac{H}{U}, \quad \frac{H}{U} < 4 \quad (1.2)$$

Die in zwei Abschnitte geteilte Funktion nach den Beziehungen Formel (1.1) und Formel (1.2) ist am Punkt $H/U = 4$ zwar stetig, jedoch nicht differenzierbar („geknickt“). Dieser Umstand bewirkt in den folgenden Datenkurven in der Auftragung über der Konzentration c_U (anstelle H/U) im Bereich zwischen etwa 3,3 und 3,65 gU/cm³ eine Diskontinuität, also eine Lücke in den Datenkurven. Diese Lücke spiegelt den genannten Phasenübergang wider.

Die neuen Kritikalitätsrechnungen wurden mit dem S_N -Code XSDRN aus dem amerikanischen Codepaket SCALE 4.4a /RSI 00/ und der auf ENDF/B-V-Daten basierenden 238-Gruppenbibliothek dieses Pakets im “search“-Modus durchgeführt. Punktuell wurden die errechneten Werte, v. a. bei den kleinsten kritischen Werte, mit den Codes KENO-V.a aus

SCALE 4.4a und SCALE 5 sowie mit MCNP 4 Version C2 überprüft. Validierungsrechnungen anhand von 52 Benchmark-Experimenten wurden durch das in SCALE 5 implementierte Sensitivitäts- und Unsicherheitsverfahren TSUNAMI unterstützend begleitet /KIL 09/.

Die neuen Kritikalitätsdaten beziehen sich auf homogene Mischungen von Uranoxifluorid und Wasser mit ^{235}U -Anreicherungen von 2 bis 6 Gew%, die als Kurvenparameter angegeben sind. Als Reflektor wird stets ein 30 cm dicker Wasserreflektor der Dichte $1,0\text{ g/cm}^3$ angenommen. Tab. 1.C.A fasst die daraus abgeleiteten Kritikalitätsdaten für homogene UO_2F_2 -Wasser-Systeme bei reaktivster Urankonzentration zusammen. Die hier in Klammern angegebenen sicheren Kritikalitätsdaten der neuen Rechnungen sind als vorläufig anzusehen, denn sie basieren lediglich auf den angegebenen Sicherheitsfaktoren und sind gegenüber dem Kriterium $k_{\text{eff}} \leq 0,98$ u. U. leicht nichtkonservativ.

Tab. 1.C.A Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene UO_2F_2 -Wasser-Systeme bei reaktivster Urankonzentration

Anreicherung [Gew% ^{235}U]	Masse [kg U]		Volumen [Liter]	
	kritisch	sicher ²	kritisch	sicher ²
2	308	(139,0)	150	(120,0)
3	102	(45,9)	62,8	(50,2)
4	56,0	(25,2)	40,9	(32,7)
5	37,3	(16,7)	31,3	(25,0)
6	27,5	(12,3)	26,0	(20,8)
10 ¹	13,6	6,0	20,5	16,0
30 ¹	3,2	1,4	10,7	8,0
50 ¹	1,75	0,78	8,6	6,5
100 ¹	0,8	0,35	6,2	4,8
Anreicherung [Gew% ^{235}U]	Durchmesser eines infiniten Zylinders [cm]		Dicke einer infiniten Schicht [cm]	
	kritisch	sicher ²	kritisch	sicher ²
2	47,3	(42,6)	26,1	(23,5)
3	34,6	(31,1)	18,0	(16,2)
4	29,6	(26,6)	14,8	(13,3)
5	26,9	(24,2)	13,0	(11,7)
6	25,1	(22,5)	11,9	(10,7)
10 ¹	22,7	20,4	10,2	9,2
30 ¹	17,7	15,9	7,0	6,0
50 ¹	16,4	14,7	6,2	5,0
100 ¹	14,3	12,7	5,0	3,8

¹ Rechnungen von 1974

² Sicherheitsfaktoren:

- Sichere Masse $\leq 45\%$ der kritischen Masse
- Sicheres Volumen $\leq 80\%$ des kritischen Volumens
- Sichere Dimension $\leq 90\%$ der kritischen Dimension

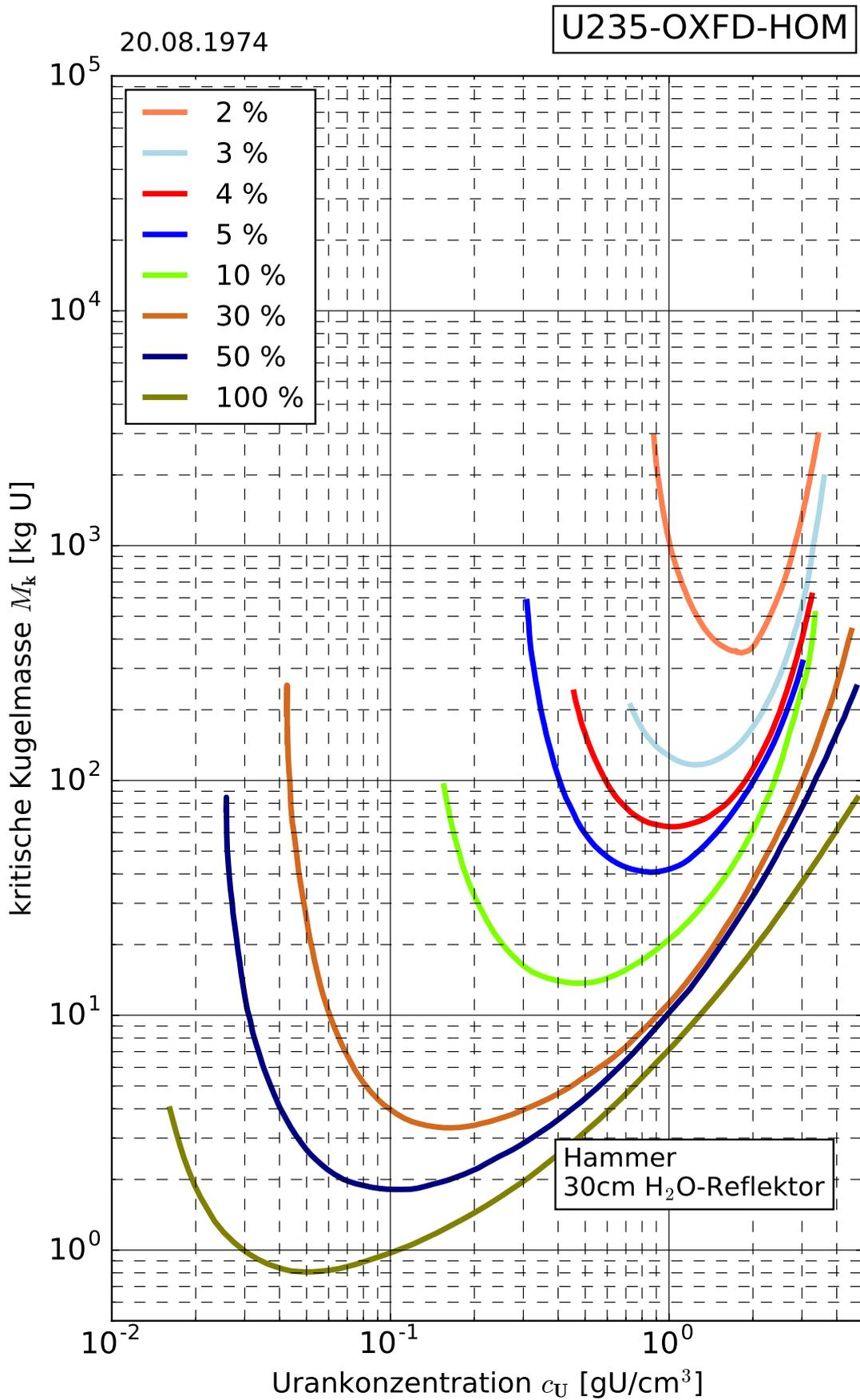


Abb. 1.C.1.a Kritische Kugelmasse von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen

28.01.2008

U235-OXFD-HOM

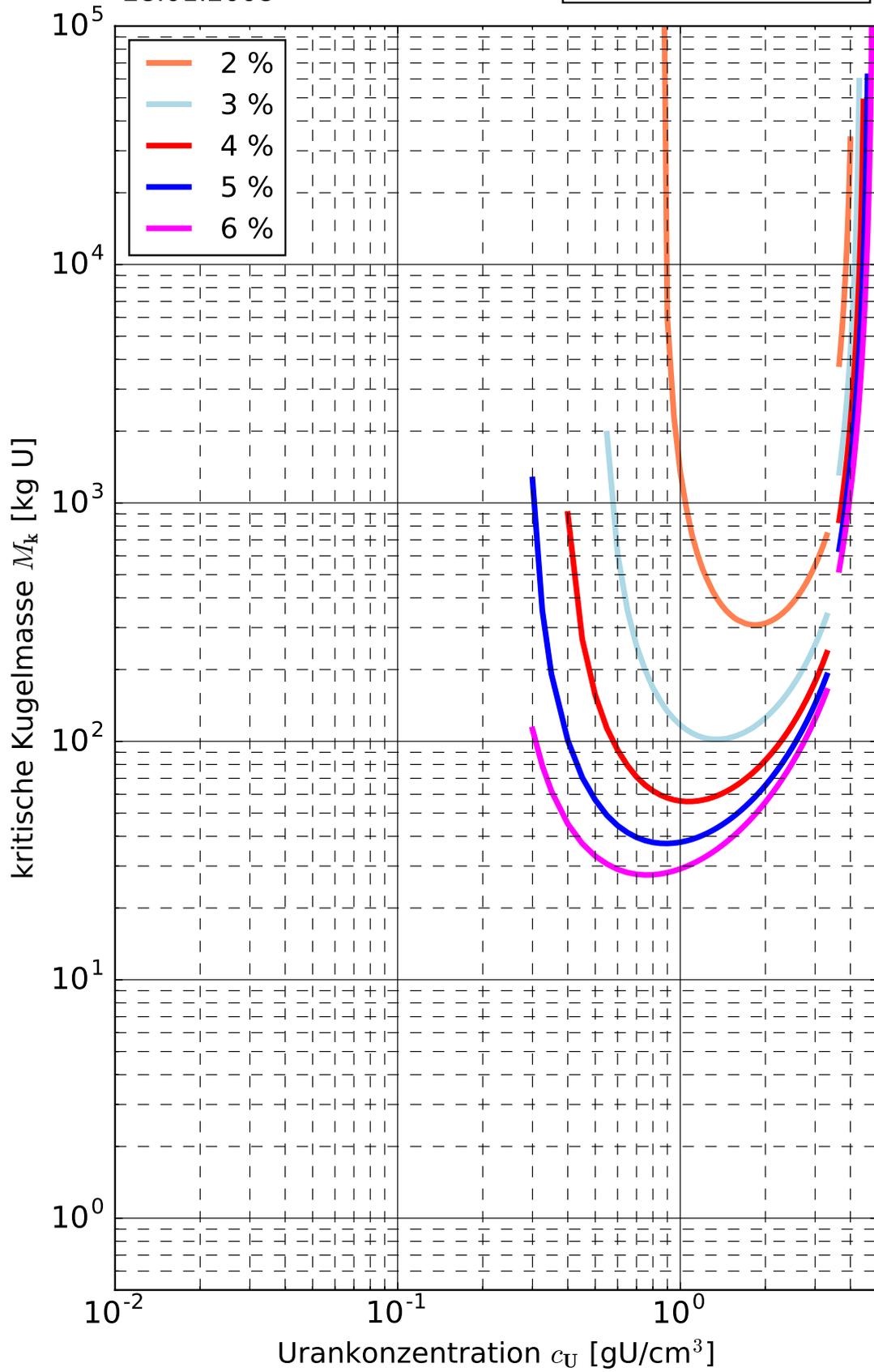


Abb. 1.C.1.b Kritische Kugelmasse von homogenen UO₂F₂-Wasser-Systemen

20.08.1974

U235-OXFD-HOM

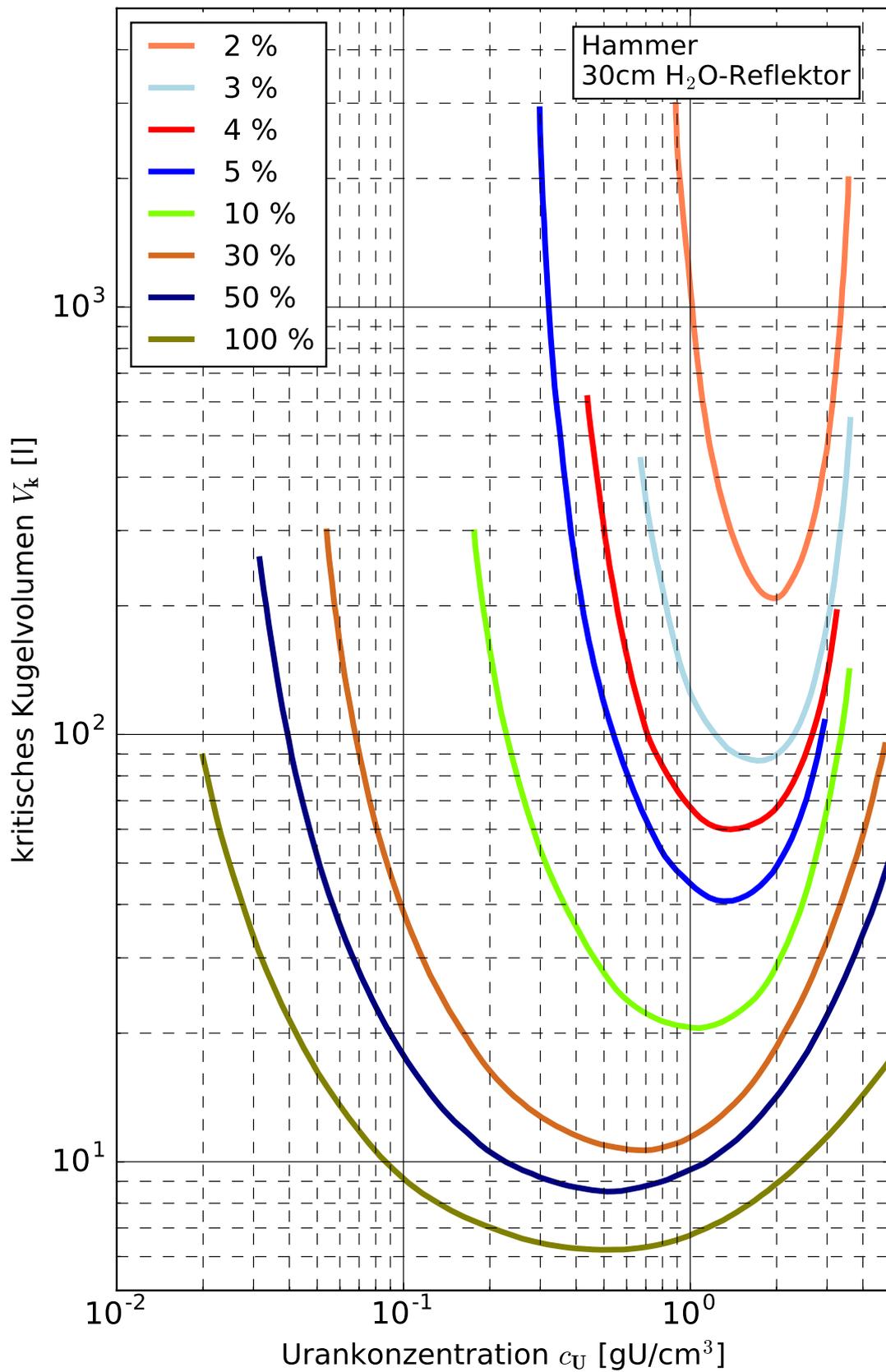


Abb. 1.C.2.a Kritisches Kugelvolumen von homogenen UO₂F₂-Wasser-Systemen

28.01.2008

U235-OXFD-HOM

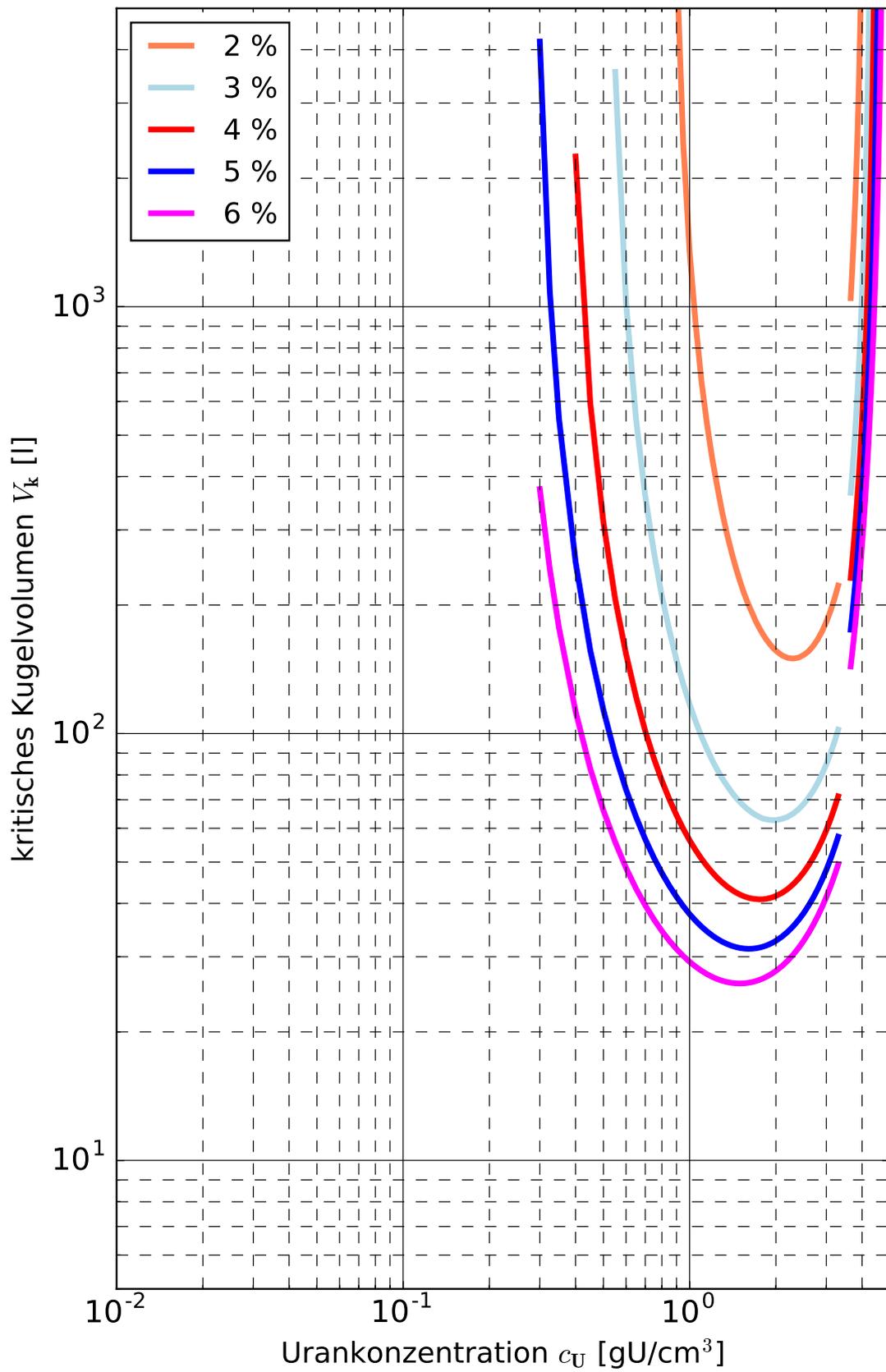


Abb. 1.C.2.b Kritisches Kugelvolumen von homogenen UO₂F₂-Wasser-Systemen

10.03.1974

U235-OXFD-HOM

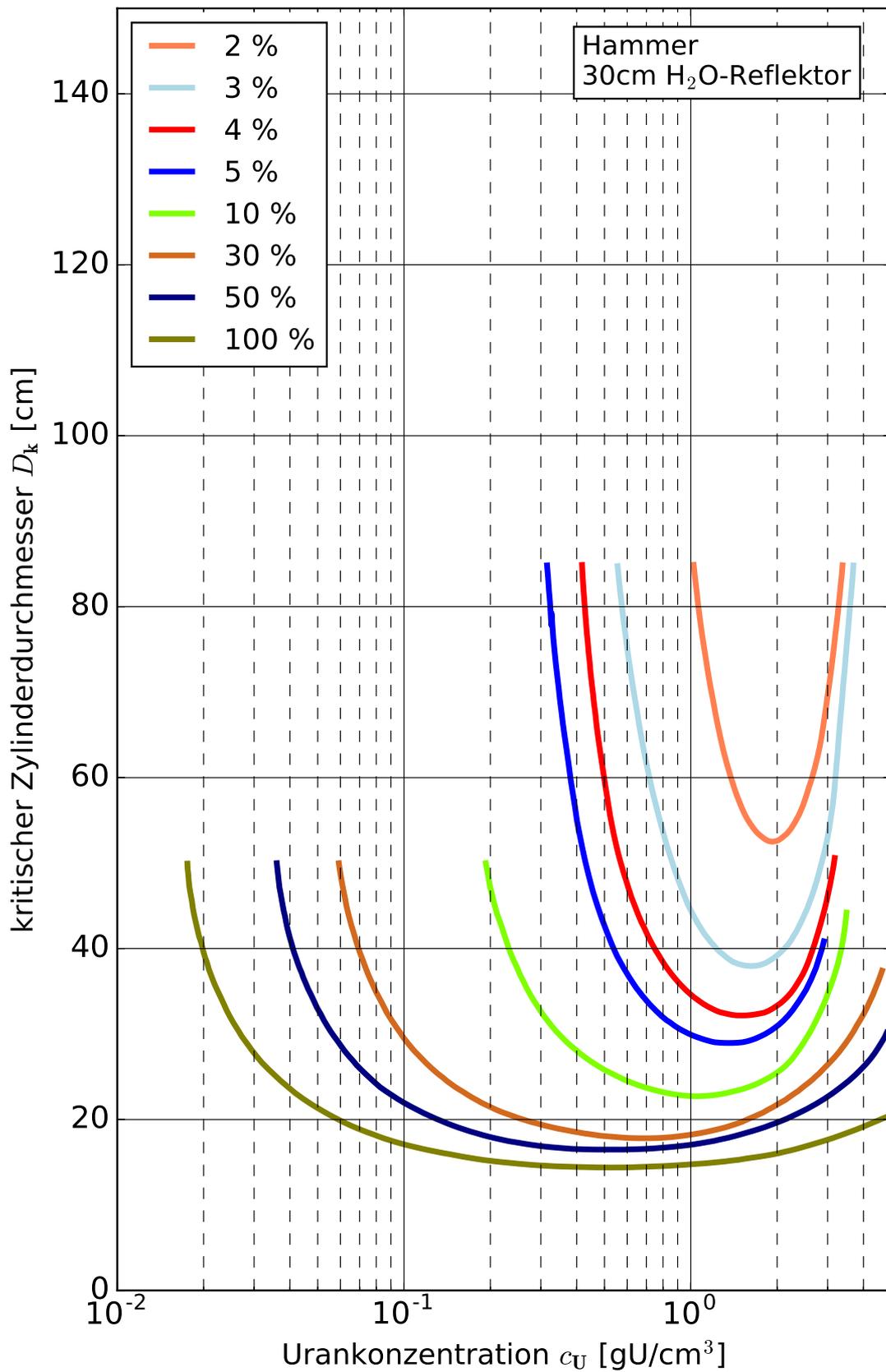


Abb. 1.C.3.a Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen

28.01.2008

U235-OXFD-HOM

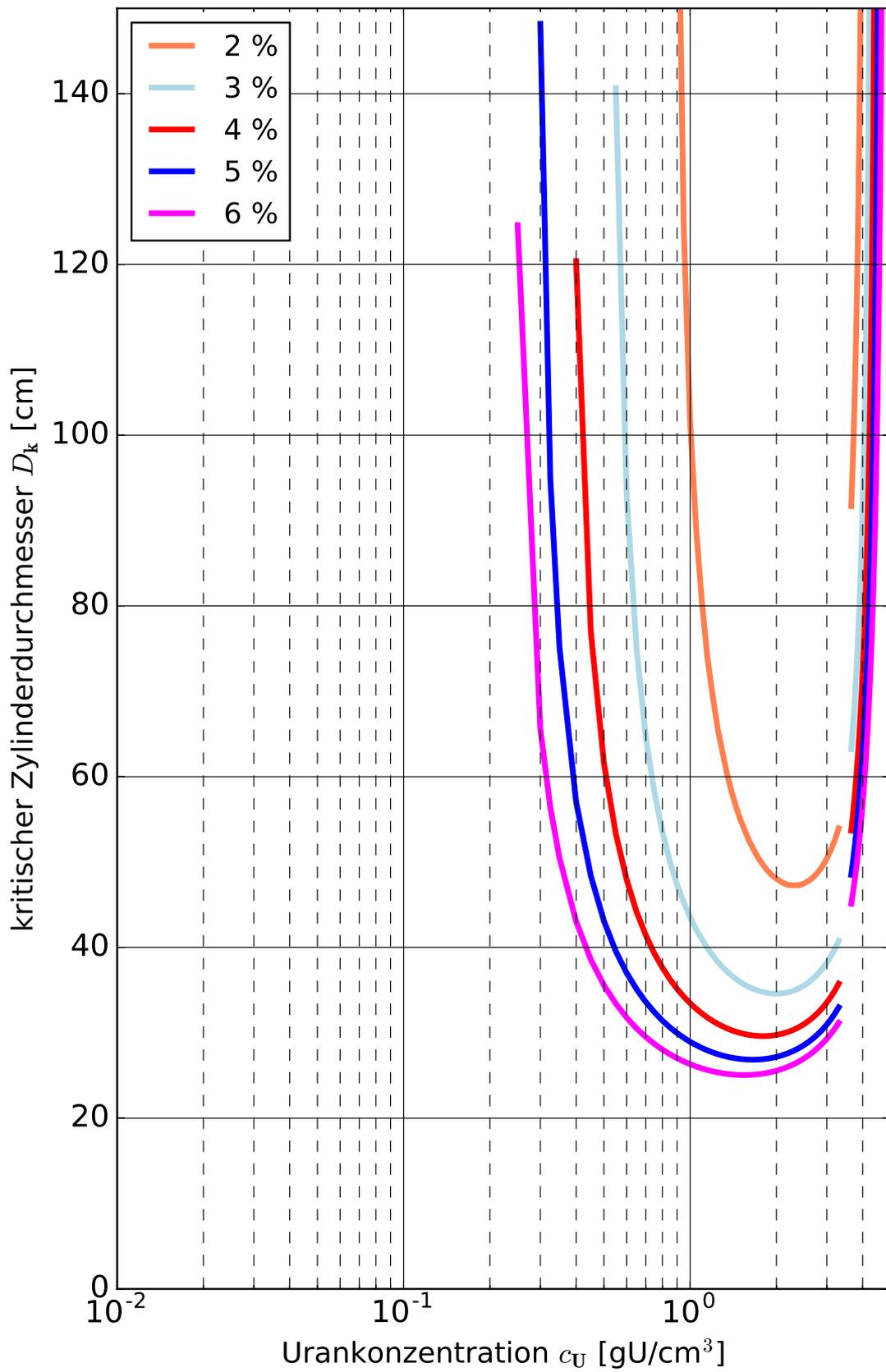


Abb. 1.C.3.b Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen

10.03.1974

U235-OXFD-HOM

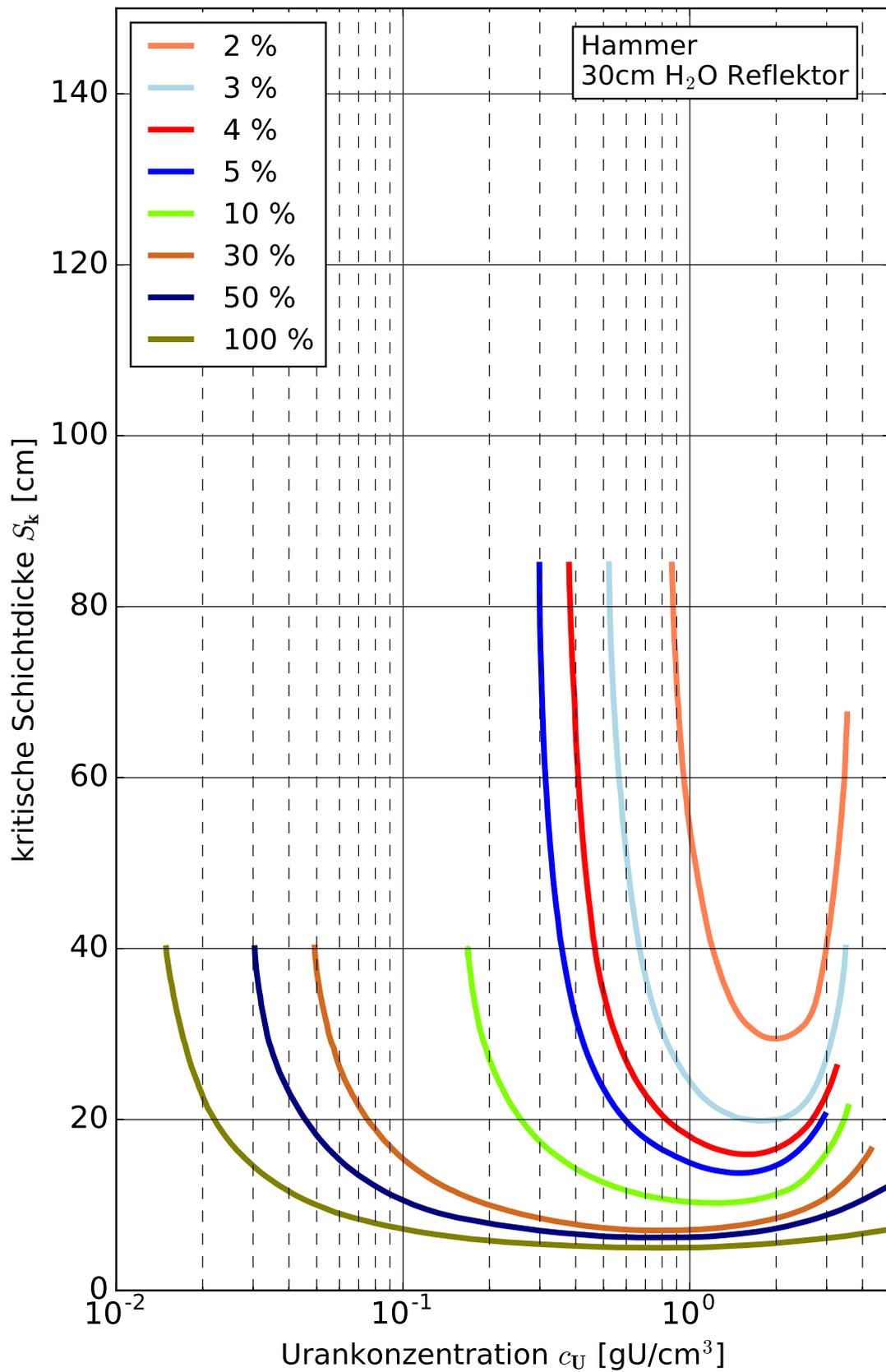


Abb. 1.C.4.a Kritische Schichtdicke von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen

28.01.2008

U235-OXFD-HOM

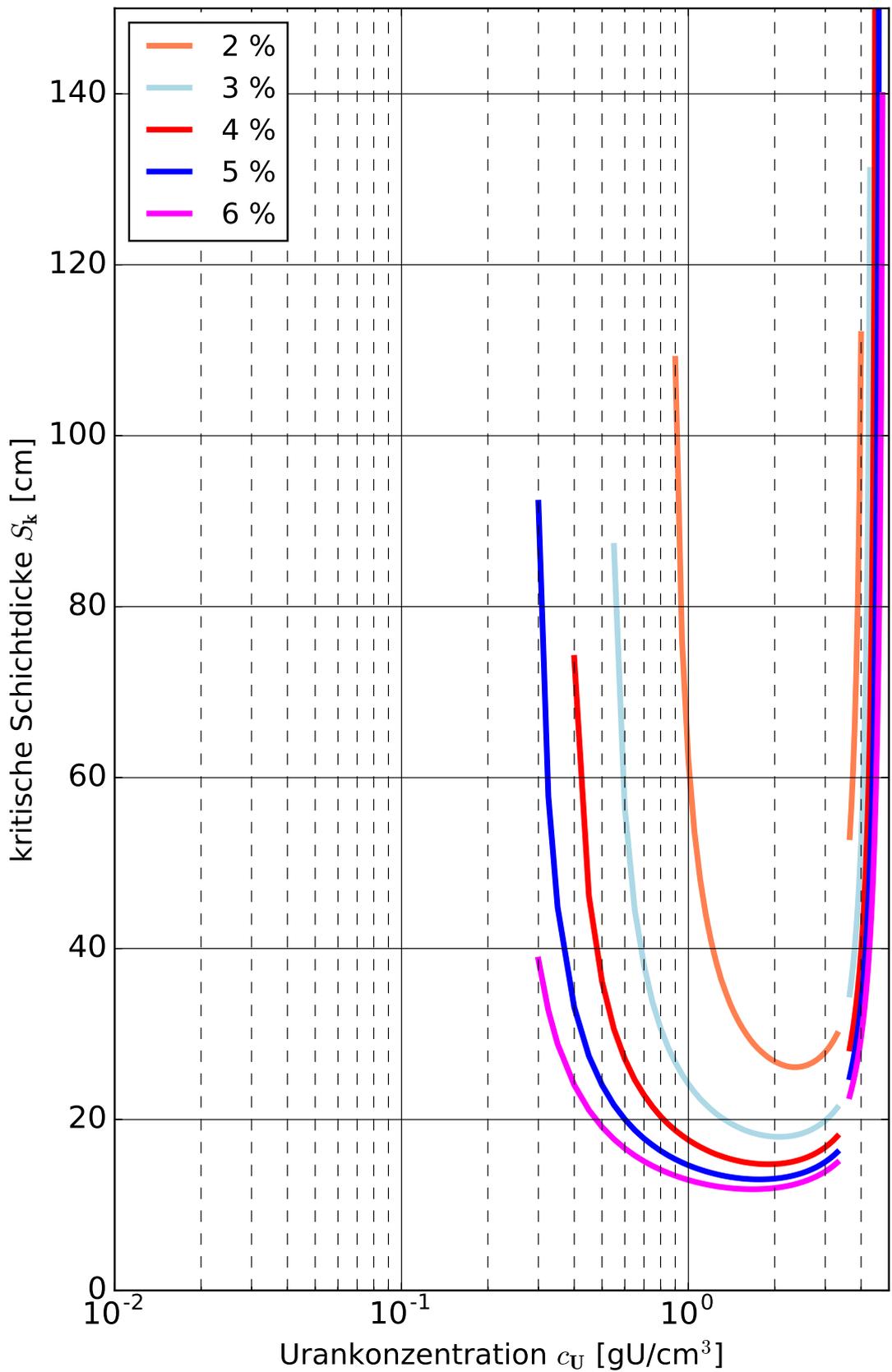


Abb. 1.C.4.b Kritische Schichtdicke von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen

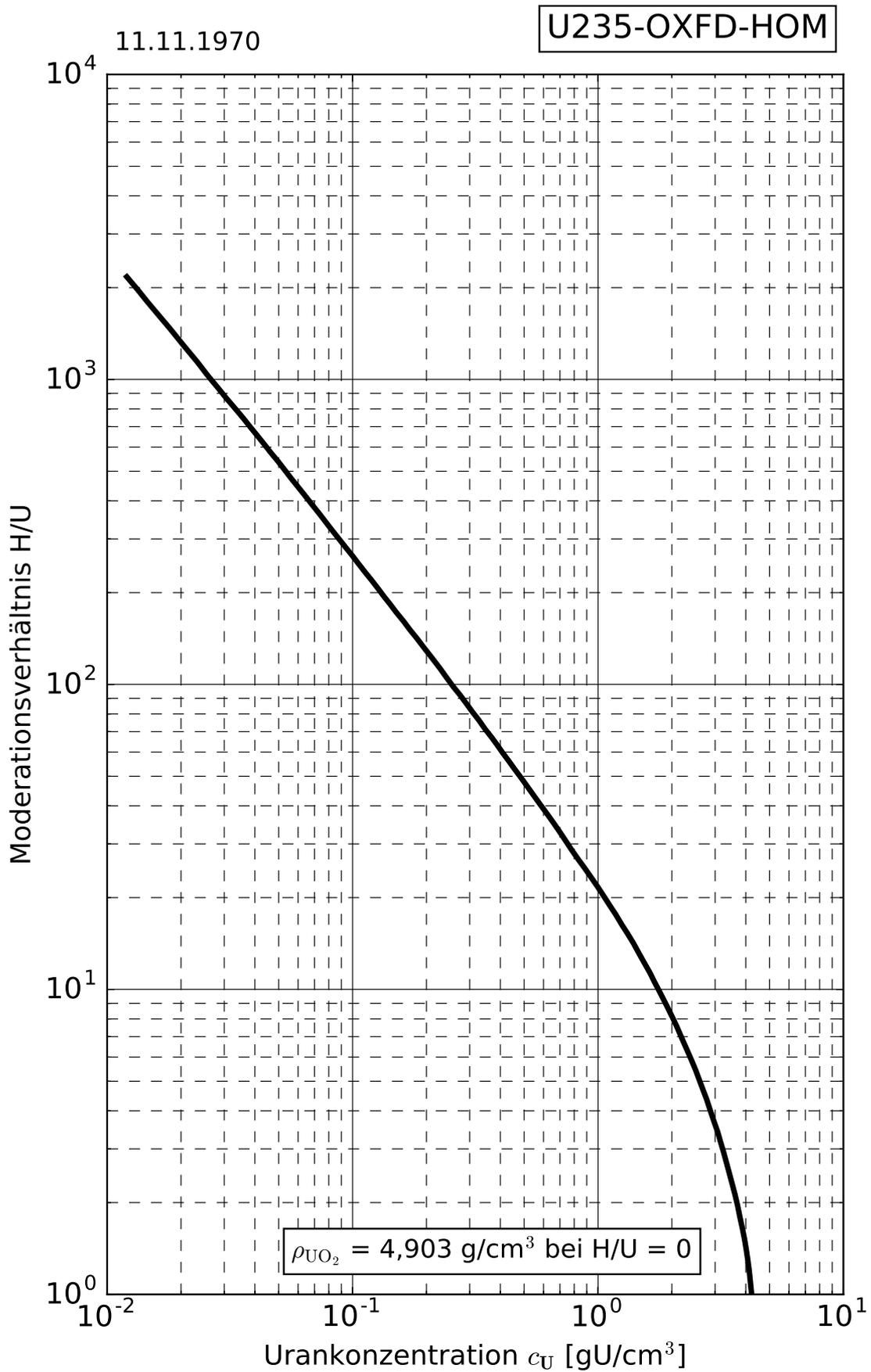


Abb. 1.C.5.a Moderationsverhältnis von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen

17.04.2019

U235-OXFD-HOM

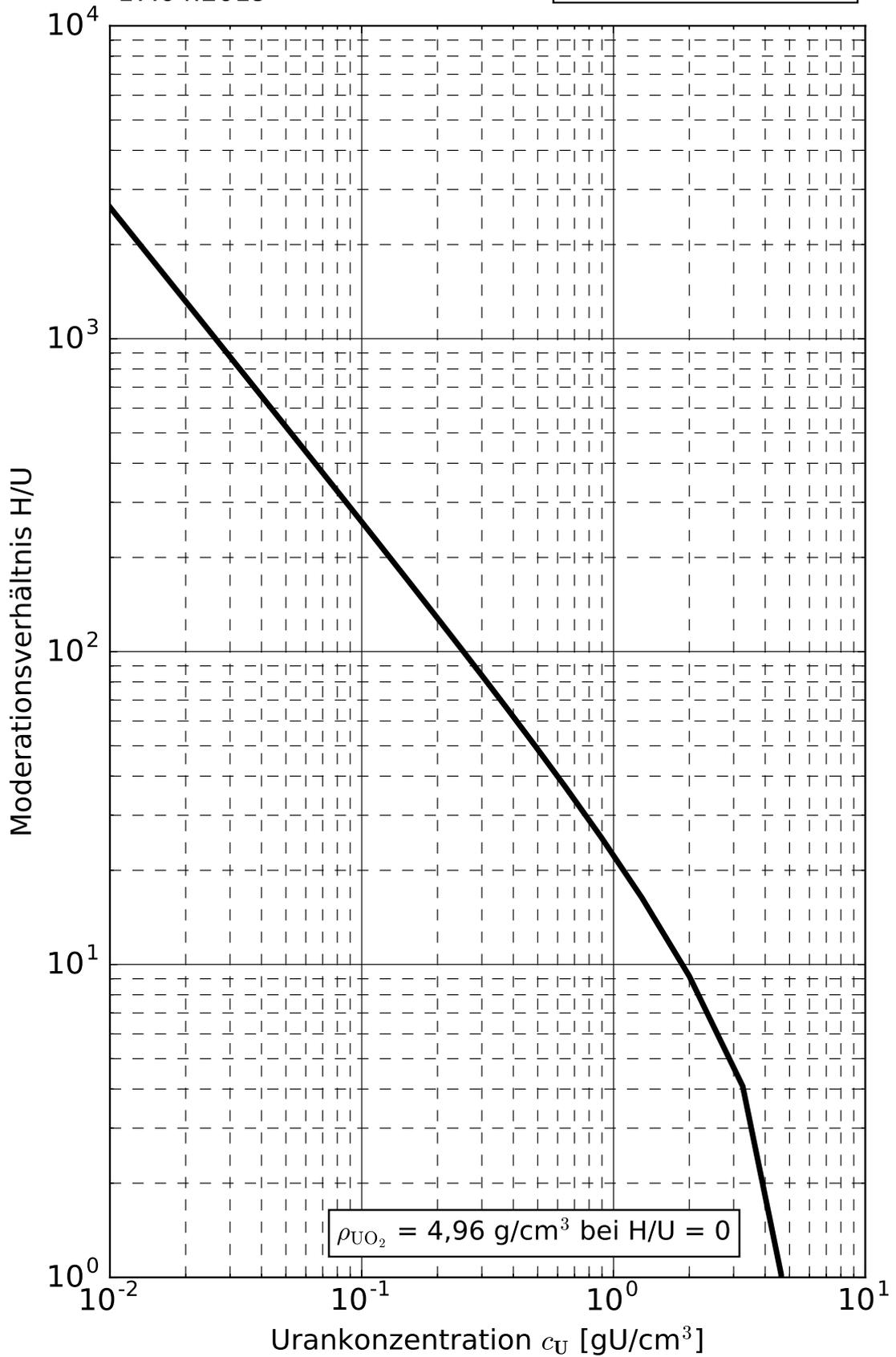


Abb. 1.C.5.b Moderationsverhältnis von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen

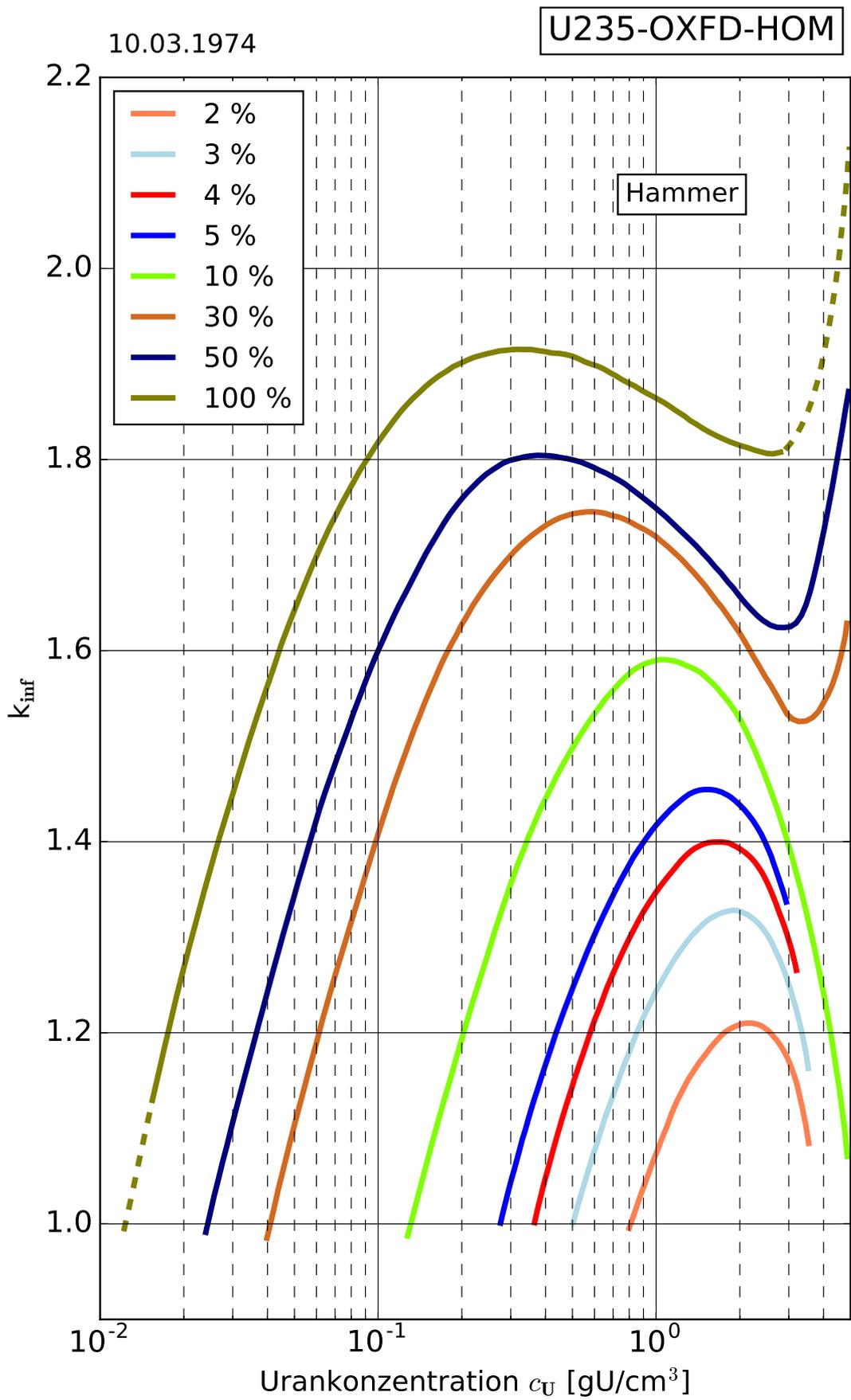


Abb. 1.C.6 Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen

20.08.1974

U235-OXFD-HOM

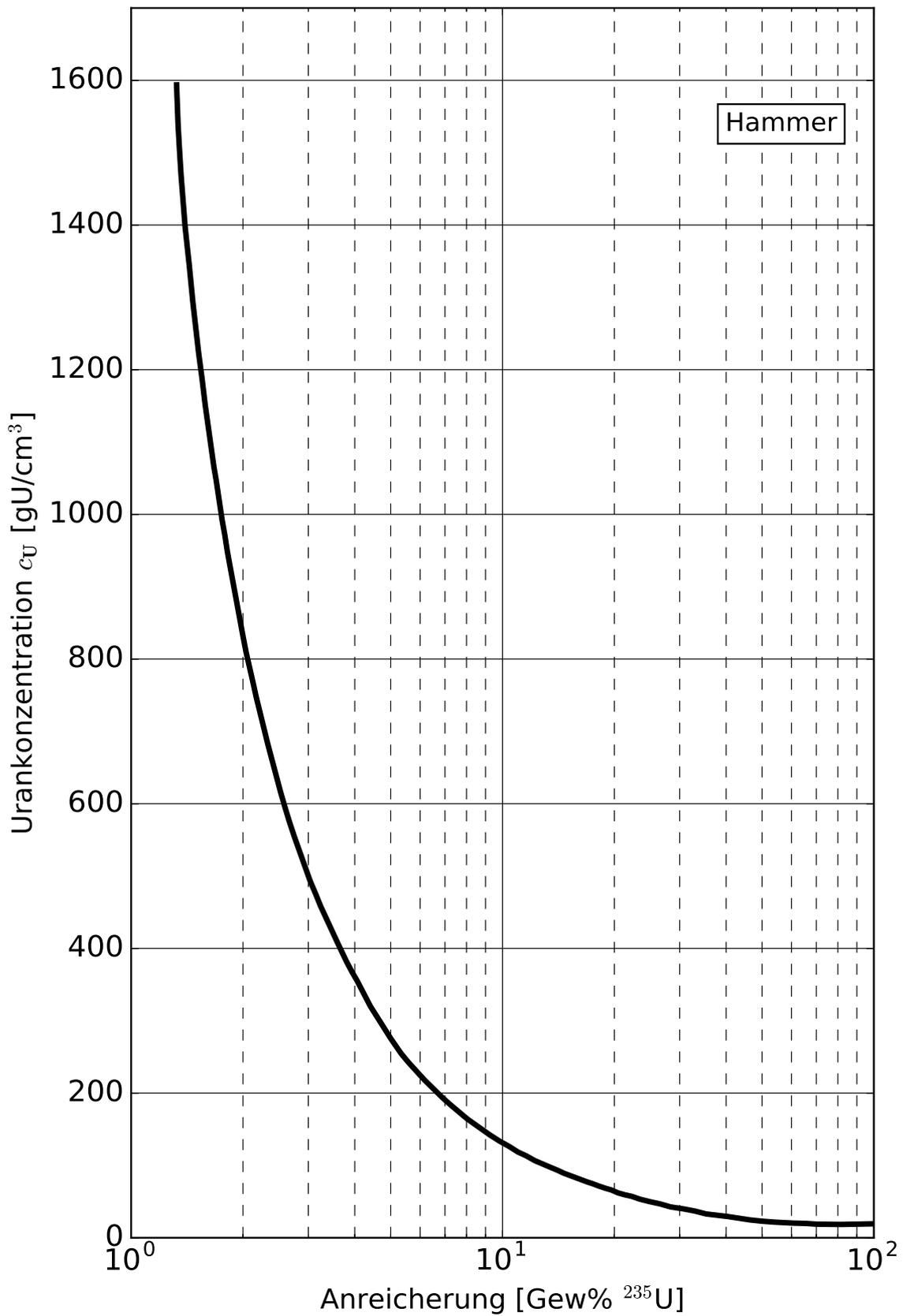


Abb. 1.C.7 kleinste kritische Urankonzentration von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen

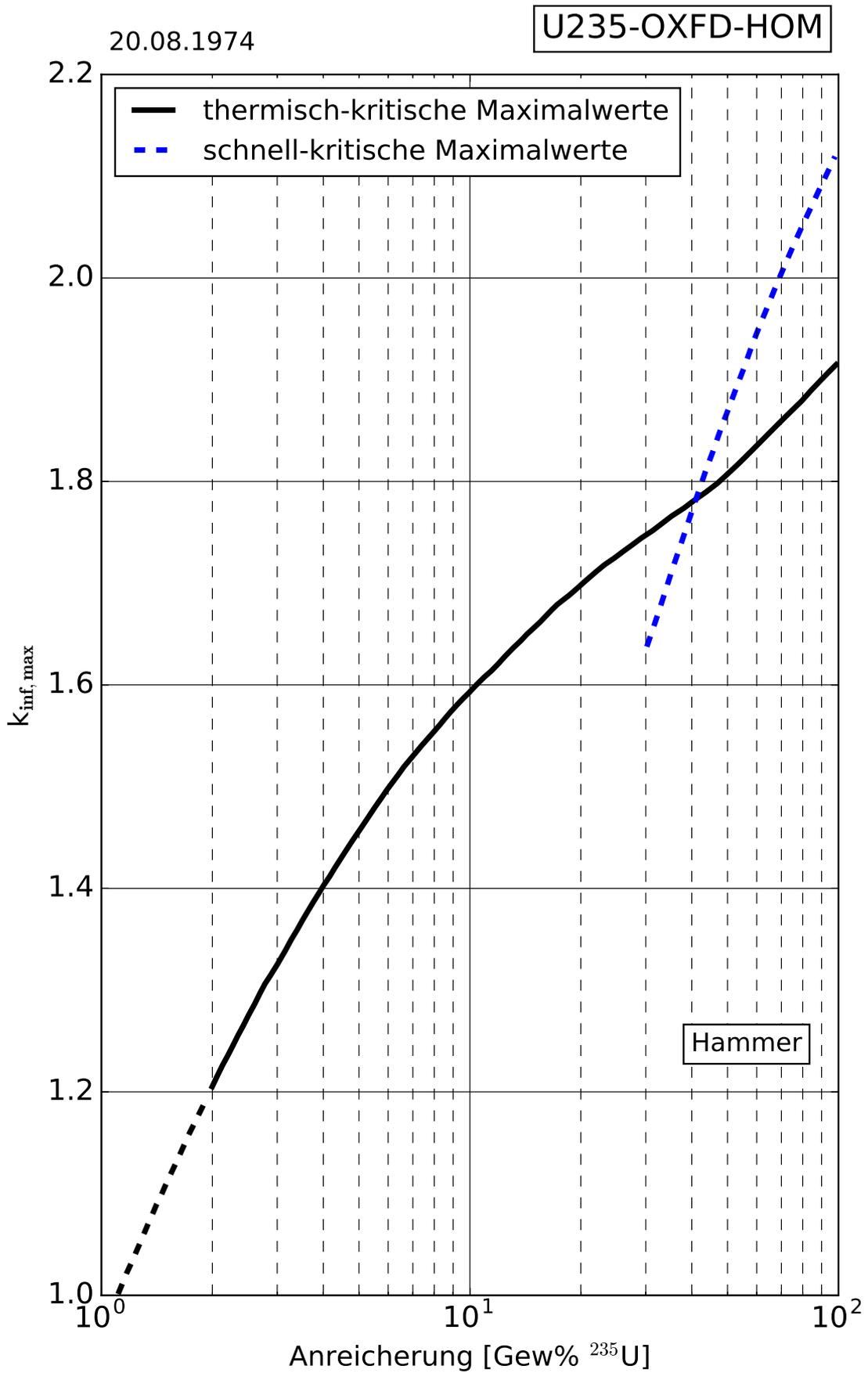


Abb. 1.C.8 Maximaler infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen

1.F Homogene Uranyl Nitrat-Wasser-Systeme

Die folgenden Tabellen und Kurvenblätter enthalten Kritikalitätsparameter für Uranyl Nitrat-Systeme verschiedener ^{235}U -Anreicherungen von 2,5 bis 100 Gew%. Diese ist jeweils als Parameter für die entsprechende Kurve angegeben. Sämtliche kritische Werte gelten für voll wasserreflektierte Systeme (30 cm Wasserreflektor).

Das Uranyl Nitrat entspricht der chemischen Formel $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ mit einer theoretischen Dichte von $2,807 \text{ g/cm}^3$ /WAC 63/, /HOM 11/. Damit ergibt sich ein maximaler Urangehalt von $1,33 \text{ gU/cm}^3$. Ist der Nitratanteil durch zusätzliche Salpetersäure HNO_3 erhöht, so wird die Lösung durch den als mildes Neutronengift wirkenden Stickstoff weniger reaktiv; die in diesem Kapitel aufgeführten Kurven sind in diesem Fall also anwendbar. Liegt hingegen der Nitratanteil niedriger als in der oben angegebenen chemischen Summenformel, so sind die in diesem Kapitel zusammengestellten Daten nicht anwendbar. Es ist dann die Anwendung von Urandioxid-Daten zu empfehlen, die unter Kapitel 1.B zusammengestellt sind, sofern identische Moderationsverhältnisse herrschen.

Die Daten der Kurvenblätter in Abb. 1.F.1 bis Abb. 1.F.8 aus dem Jahr 2018 wurden mit dem Code XSDRN der Steuersequenz CSAS1 aus dem Programmsystem SCALE 6.2.2 /REA 17/ im "search"-Modus erzeugt. Zur Berechnung wurden nukleare Querschnittsdaten aus der 252-Gruppen-Bibliothek v7-252 verwendet, die auf den ENDF/B-VII.1-Daten /CHA 11/ basieren. Diese Daten wurden durch umfangreiche Experimentnachrechnungen von der GRS validiert /SOM 19/. Diese neu berechneten Werte der Kritikalitätsparameter liegen für sämtliche Anreicherungen nahe oder unterhalb der historischen Werte aus den 70ern und 80ern. Bei höheren Anreicherungen reduziert sich dieser Unterschied. Während die Werte im Minimum des kritischen Kugelvolumens für 3 Gew% ^{235}U um 15 % abweichen, schwanken sie für 10 und 100 Gew% ^{235}U um $\pm 5 \%$. Ein ausführlicher Vergleich der historischen und neuen Rechnungen findet sich in /SOM 19/.

Aus den angegebenen Kritikalitätsdaten können durch Anwendung der in Band 1 dieses Handbuchs aufgeführten Sicherheitsfaktoren sichere Werte für Masse, Volumen und geometrische Abmessungen abgeleitet werden. Tab. 1.F.A und Tab. 1.F.B bringen eine Zusammenfassung kleinster kritischer und sicherer Daten.

Zusätzlich zu den neu berechneten Daten werden in Abb. 1.F.16 historische Kurven aus dem Jahr 1972 wiedergegeben. Diese zeigen für verschiedene ^{235}U -Anreicherungen die benötigte

Borkonzentration in Abhängigkeit der Urankonzentration, um $k_{\infty} = 0,9$, und $k_{\infty} = 1,0$ zu erreichen. Die Berechnungen wurden in 16 Energiegruppen mit den Codes GAMTEC /CAR 65/ und DTF-IV /LAT 65/ durchgeführt. Die ^{238}U -Resonanzabsorption wurde nach Nordheim behandelt. Nach /WEB 84/ zeigte diese Methodik bei der Nachrechnung von kritischen Experimenten mit Uranyl Nitrat-Lösung niedrigerer Anreicherung eine Tendenz zur Unterschätzung der Reaktivität. Dieser Sachverhalt zeigt sich bereits beim Vergleich zwischen neuen und historischen Rechnungen für die in Abb. 1.F.1 bis Abb. 1.F.8 dargestellten Kritikalitätsdaten. Es wird deshalb empfohlen, bei direkter Anwendung der historischen Daten gegebenenfalls höhere Sicherheitsabschläge zu berücksichtigen. Anisotrope Streuung wurde in P_1 -Approximation berücksichtigt. Als wesentliche Literaturquellen wurden /CAR 68/, /SCH 59/, /NEE 61/, /NIC 66/, /RID 66/, /DUB 67/, /BIE 67/, /BIE 68/, /DUN 69/, /MAU 78/, /ROT 78/, /OHJ 78/, /WEB 84/ und /SHO 95/ herangezogen.

Tab. 1.F.A Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene sphärische $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ -Wasser-Systeme bei reaktivster Urankonzentration

Anreicherung [Gew% ^{235}U]	Masse [kg U]		Volumen [Liter]	
	kritisch	sicher ¹	kritisch	sicher ¹
2	∞	∞	∞	∞
2,5	1510	442	1140	590
3	456	156	363	224
3,5	230	83,2	201	131
4	143	53,3	135	90,7
4,5	99,9	37,8	101	69,0
5	74,8	28,7	80,6	55,7
5,5	58,8	22,7	67,2	46,8
6	48,0	18,7	57,7	40,5
7	34,4	13,5	45,4	32,1
8	26,4	10,4	37,8	26,9
10	17,6	7,00	29,0	20,8
25	4,47	1,81	13,7	9,94
50	1,86	0,76	9,44	6,91
100	0,822	0,338	6,69	4,93

¹ Sicherheitsfaktoren:

Sichere Masse $\leq 45\%$ der kritischen Masse **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

Sicheres Volumen $\leq 80\%$ des kritischen Volumens **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

Tab. 1.F.B Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ -Wasser-Systeme in Zylinder- und Schichtgeometrie bei reaktivster Urankonzentration

Anreicherung [Gew% ^{235}U]	Durchmesser eines infiniten Zylinders [cm]		Dicke einer infiniten Schicht [cm]	
	kritisch	sicher ¹	kritisch	sicher ¹
2	∞	∞	∞	∞
2,5	95,8	74,2	57,6	44,0
3	64,4	52,9	37,1	30,1
3,5	52,3	43,8	29,2	24,2
4	45,4	38,4	24,8	20,7
4,5	41,0	34,8	21,9	18,4
5	37,8	32,3	19,9	16,8
5,5	35,4	30,3	18,3	15,5
6	33,5	28,7	17,1	14,5
7	30,7	26,4	15,3	13,0
8	28,7	24,8	14,0	11,9
10	26,0	22,5	12,3	10,5
25	19,6	17,1	8,23	7,00
50	17,0	14,8	6,59	5,58
100	14,9	13,0	5,20	4,36

¹ Sicherheitsfaktoren:

Sichere Dimension $\leq 90\%$ der kritischen Dimension **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

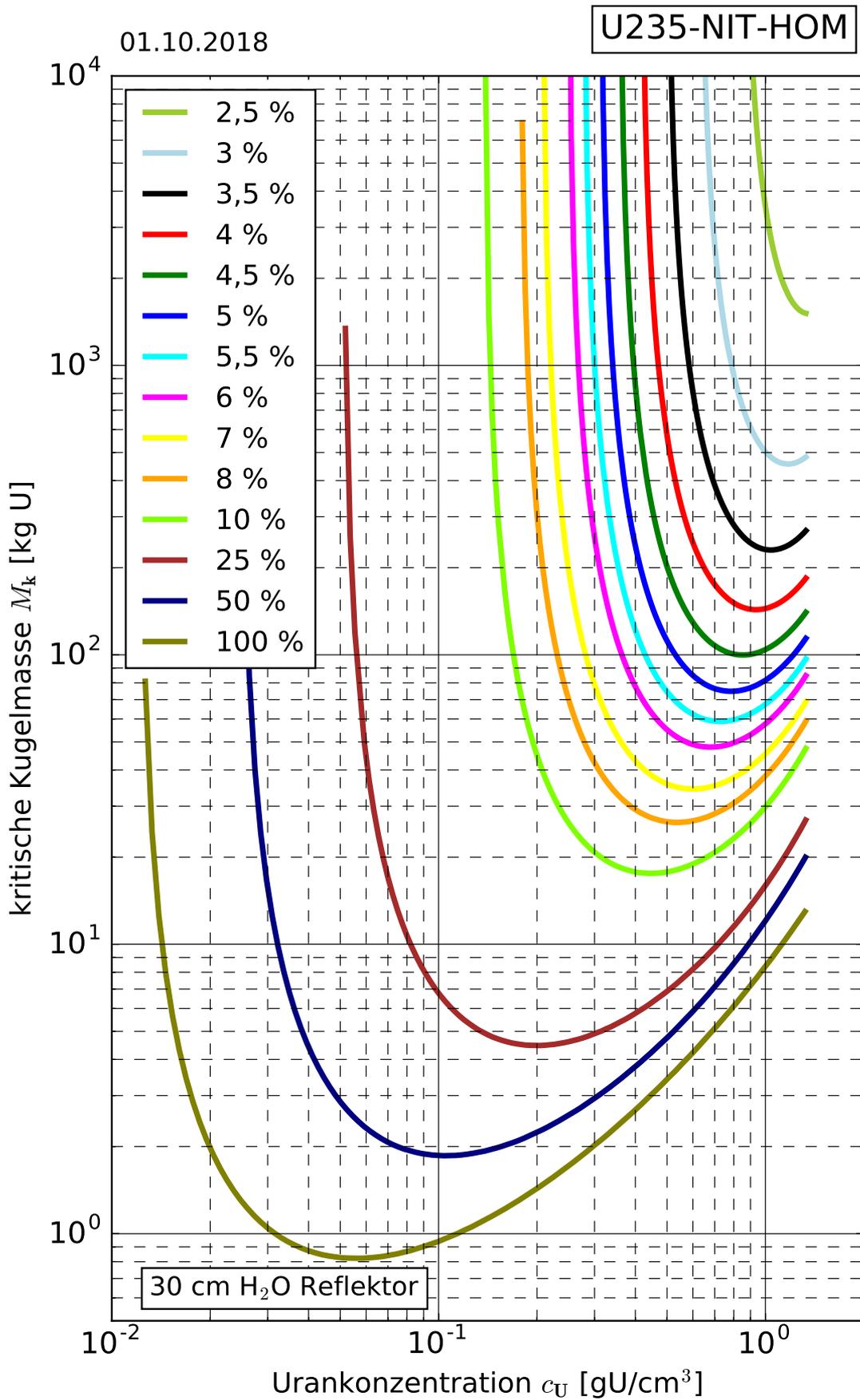


Abb. 1.F.1 Kritische Kugelmasse von Uranylinitrat-Wasser-Systemen

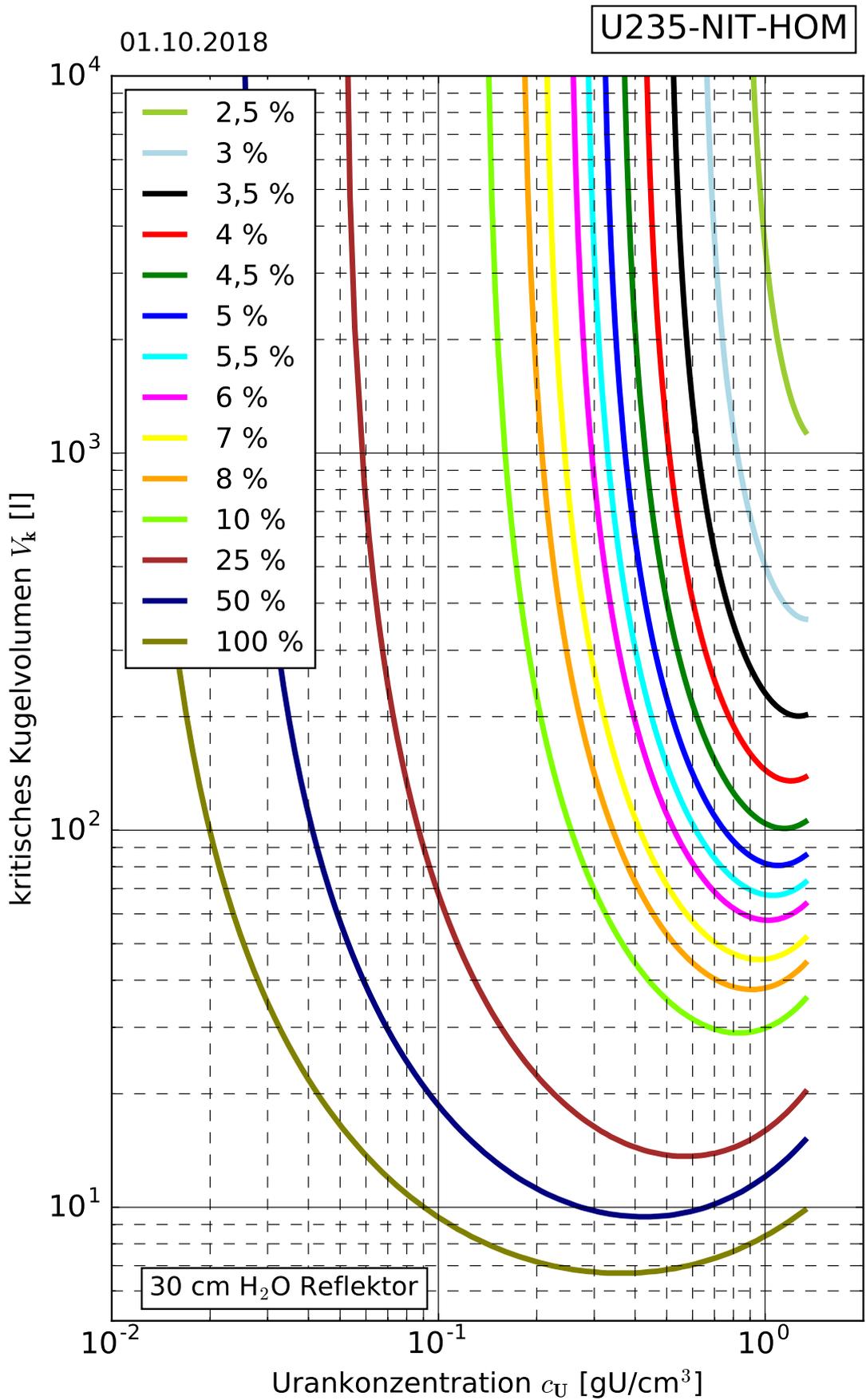


Abb. 1.F.2 Kritisches Kugelvolumen von homogenen Uranylinitrat-Wasser-Systemen

01.10.2018

U235-NIT-HOM

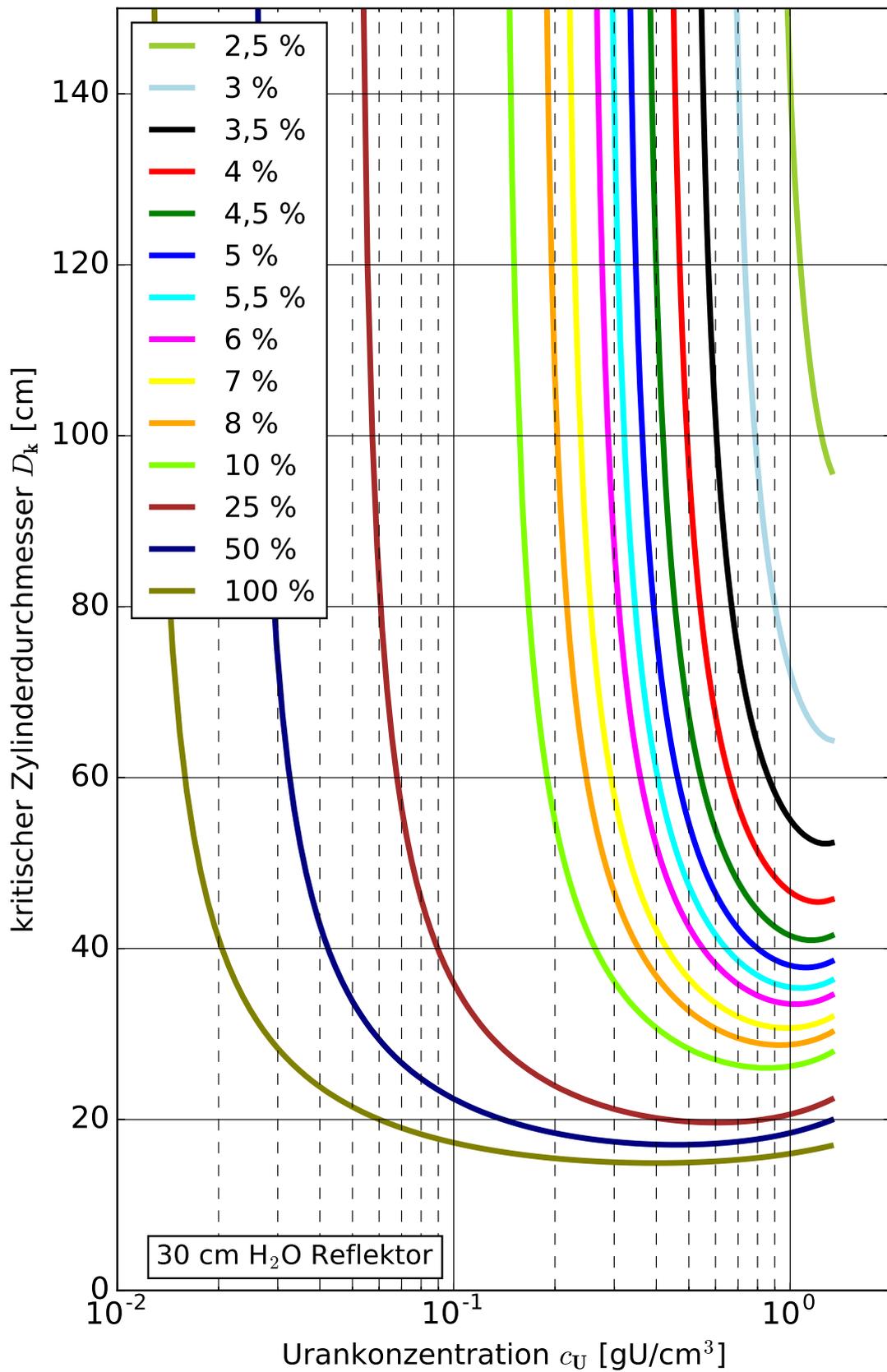


Abb. 1.F.3 Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Uranylinitrat-Wasser-Systemen

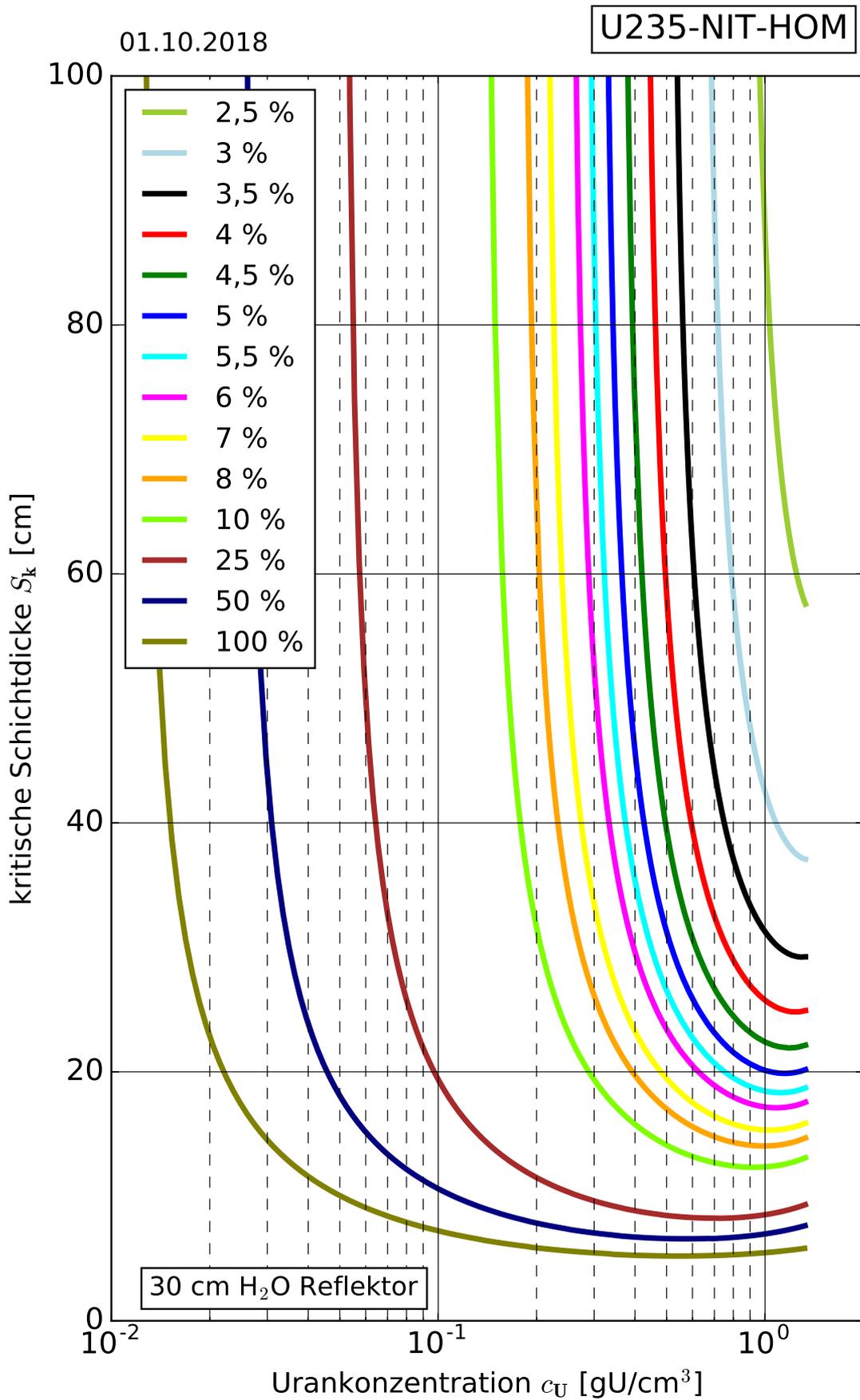


Abb. 1.F.4 Kritische Schichtdicke von homogenen Uranylinitrat-Wasser-Systemen

01.10.2018

U235-NIT-HOM

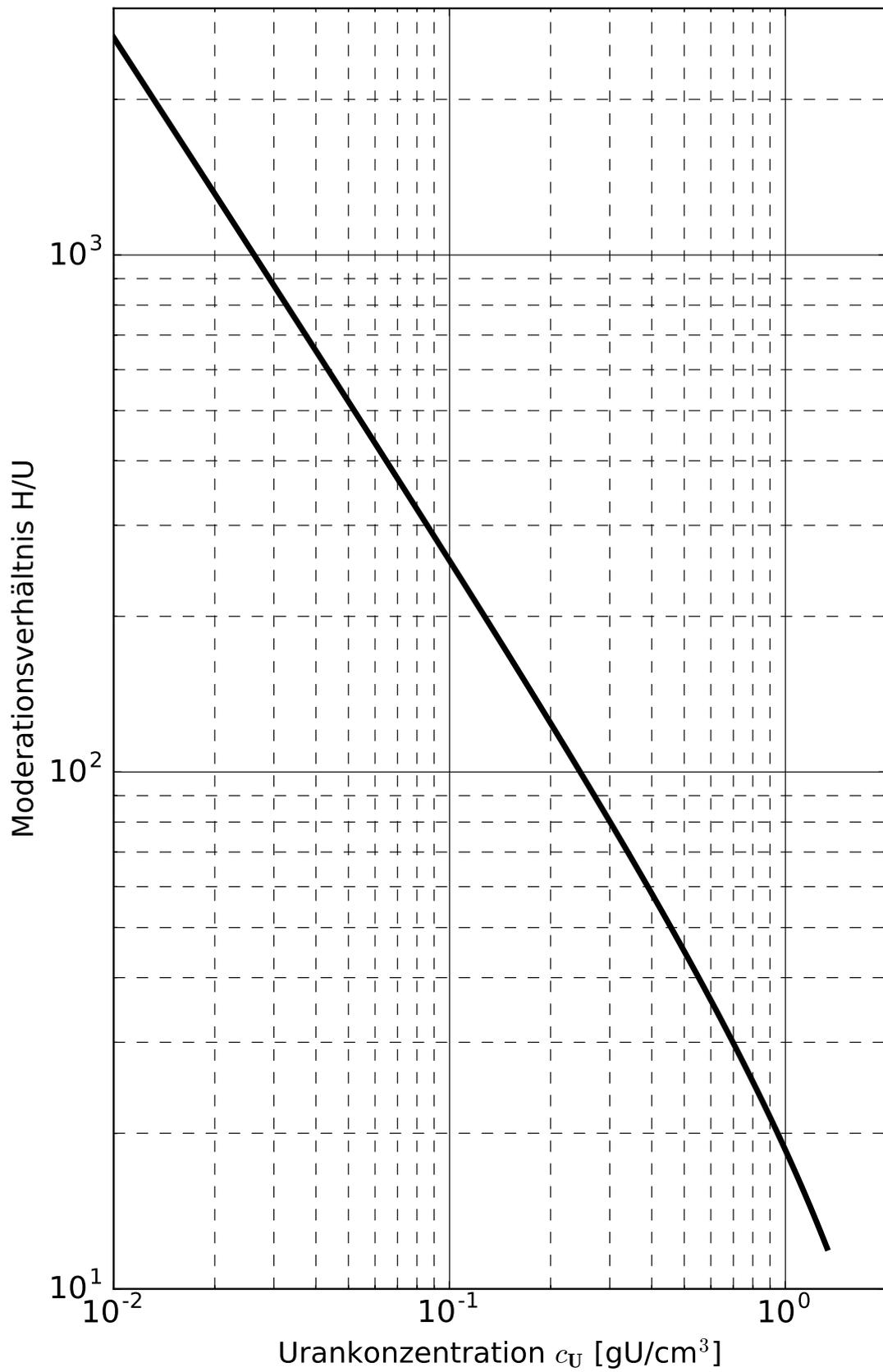


Abb. 1.F.5 Moderationsverhältnis von homogenen Uranylinitrat-Wasser-Systemen

01.10.2018

U235-NIT-HOM

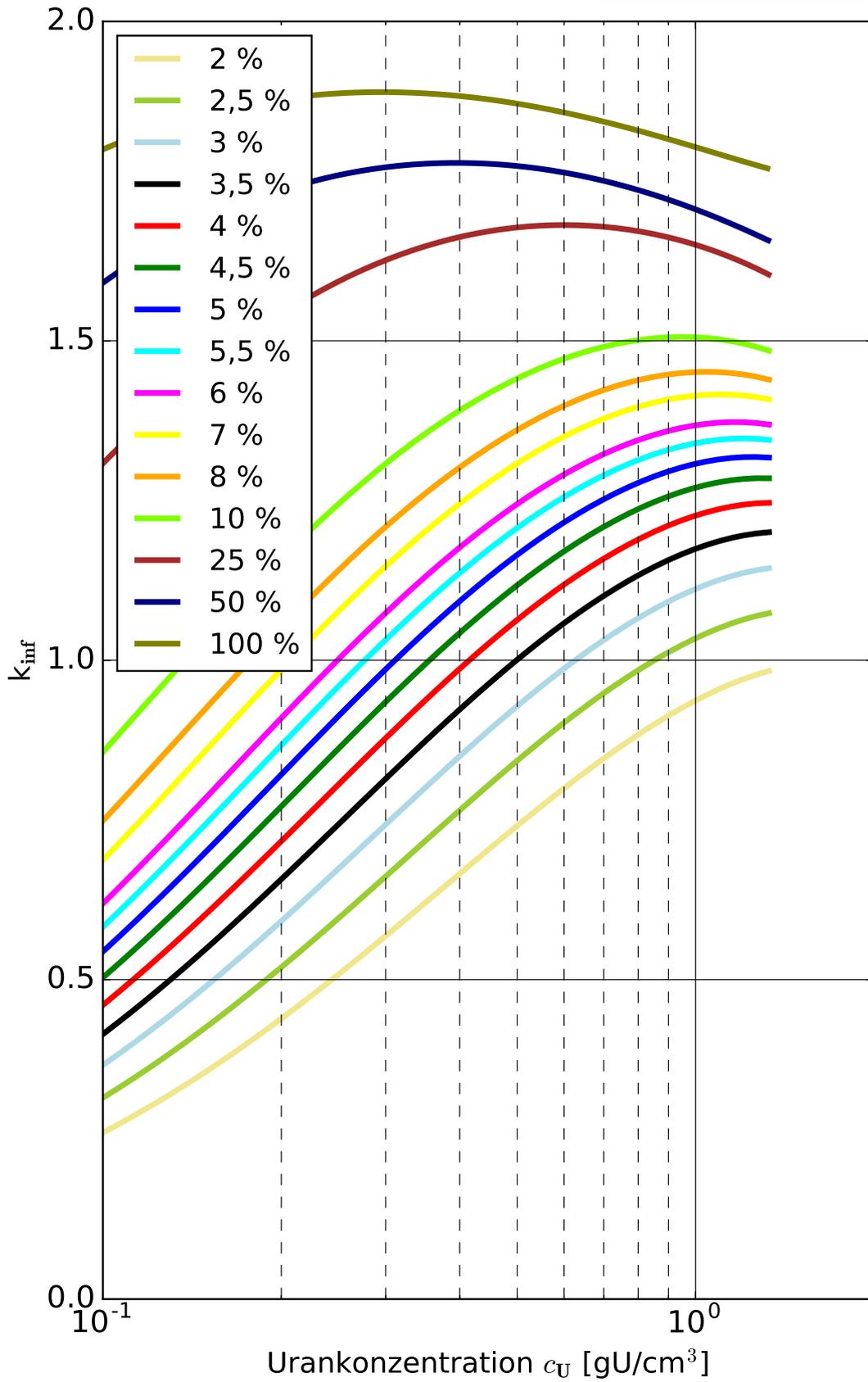


Abb. 1.F.6 Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen UranylNitrat-Wasser-Systemen

01.10.2018

U235-NIT-HOM

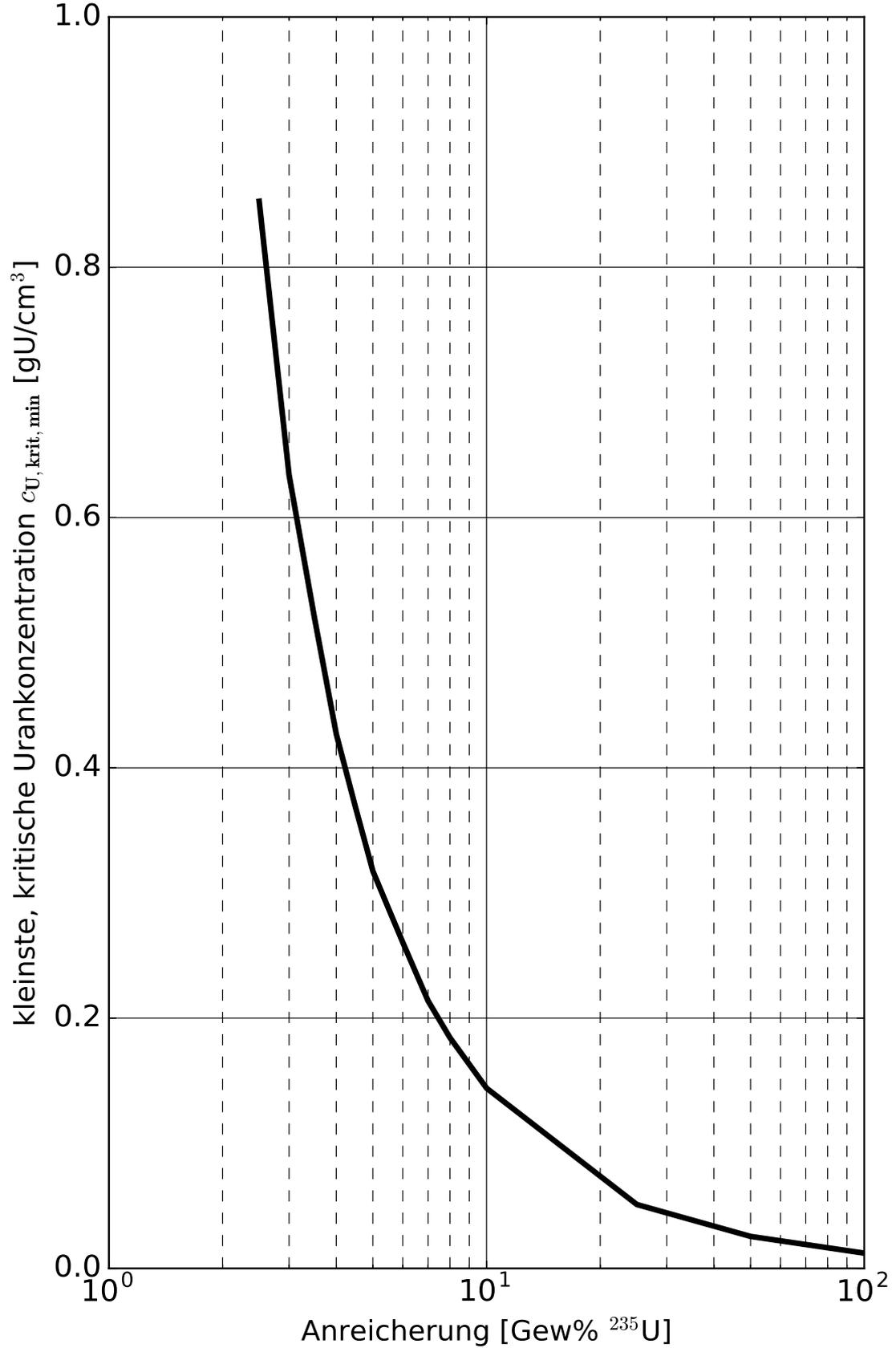


Abb. 1.F.7 Kleinste kritische Konzentration von homogenen Uranylinitrat-Wasser-Systemen

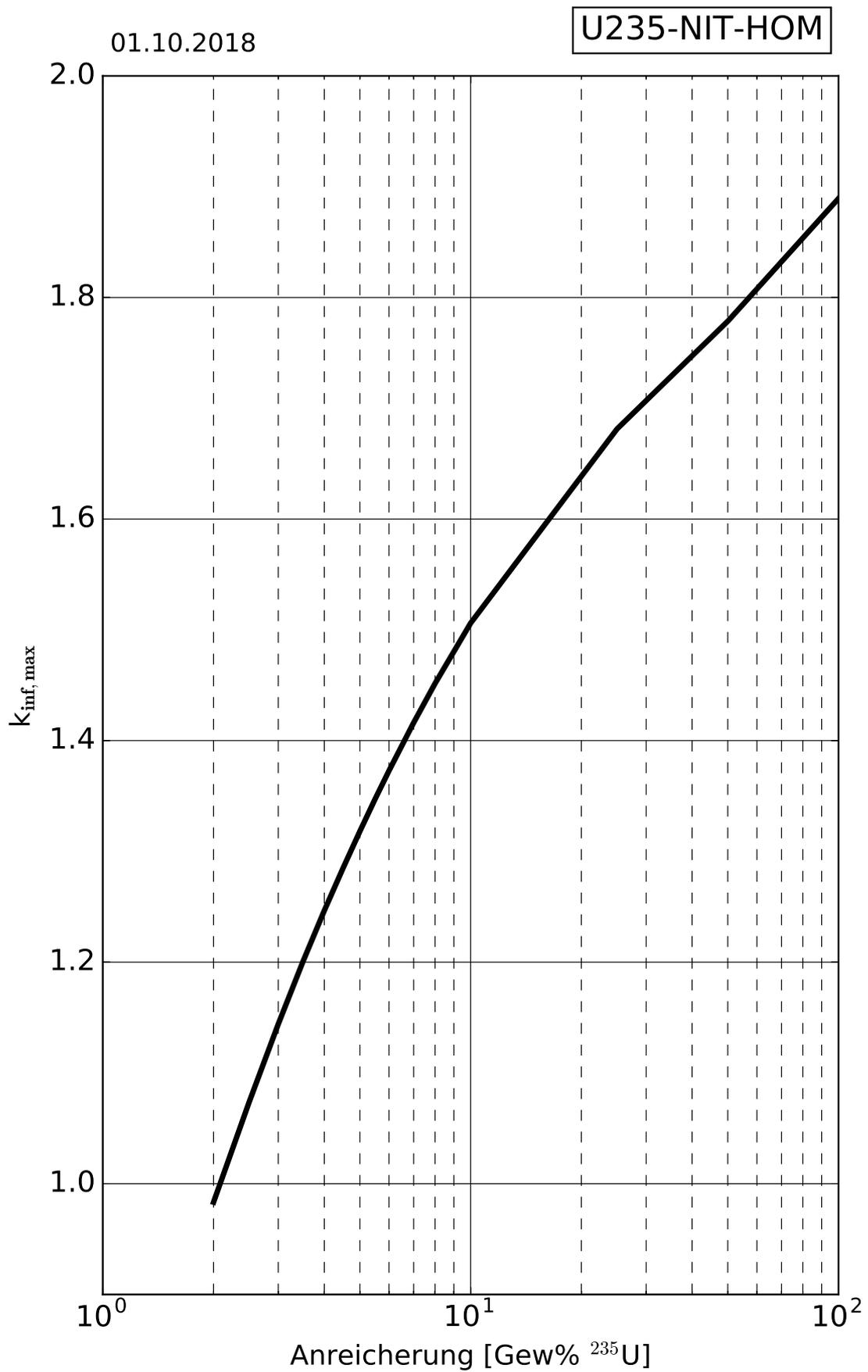


Abb. 1.F.8 Maximaler infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen Uranylinitrat-Wasser-Systemen

15.10.1972

U235-NIT-HOM

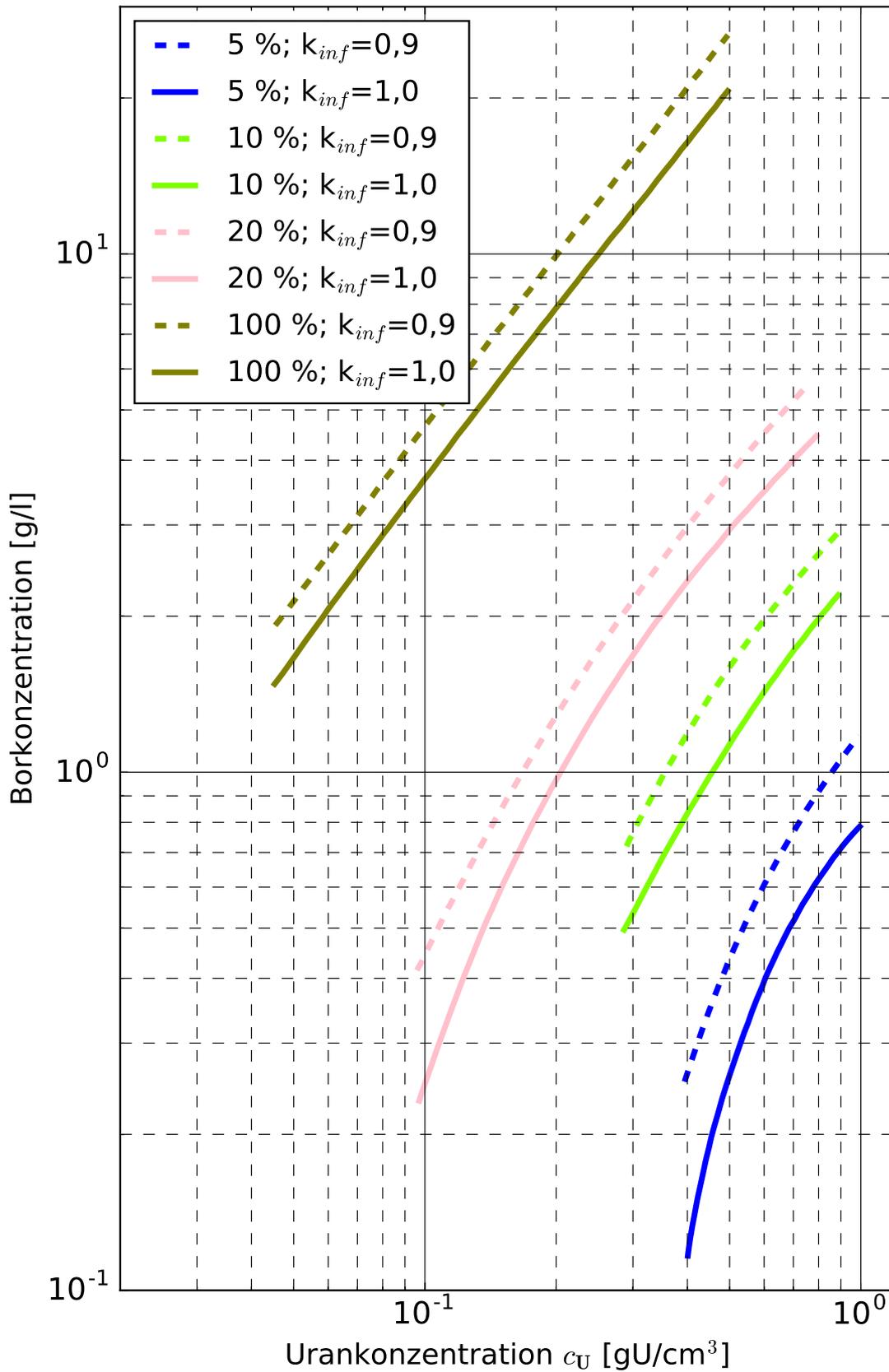


Abb. 1.F.16 Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen Uranylinitrat-Wasser-Systemen mit Borsäure-Vergiftung

1.G Homogene AUC-Wasser-Systeme

Die folgenden Tabellen und Kurvenblätter enthalten kritische Werte für homogene Ammoniumuranylcarbonat-Wasser-Systeme (AUC) verschiedener ^{235}U -Anreicherungen von 3,5 bis 100 Gew%. Diese ist jeweils als Parameter für die entsprechende Kurve angegeben. Sämtliche kritische Werte gelten für voll wasserreflektierte Systeme (30 cm Wasserreflektor der Dichte 1 g/cm^3).

Bei der Herstellung von Urandioxid, dem wichtigsten Kernbrennstoff für Leichtwasserreaktoren, tritt als Zwischenprodukt im Verlauf der nassen Konversion von Uranhexafluorid UF_6 oder Uranylнитratlösung zu Urandioxid die Verbindung Ammoniumuranylcarbonat als feinkristalline Suspension in Wasser auf. Für AUC wird folgende chemische Summenformel angegeben /MEL 07/: $(\text{NH}_4)_4\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$. Diese Zusammensetzung liegt den Berechnungen der hier angegebenen Kritikalitätsdaten zugrunde. Die maximale Dichte des AUC-Kristalls wird mit $2,83\text{ g/cm}^3$ angenommen /MEL 07/. Dieser Wert konnte durch eigene Berechnungen bestätigt werden. Daraus folgt eine maximale Uran-Dichte von $1,28\text{ gU/cm}^3$. Die feinkristallinen AUC-Wasser-Systeme mit einer Korngröße von $\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ werden als homogenes System betrachtet.

In der letzten Ausgabe dieses Handbuchs wurde für AUC die chemische Summenformel $(\text{NH}_4)_4\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ mit einer maximalen Dichte von $2,77\text{ g/cm}^3$ verwendet /VIE 64/ und /BRA 73/. Daraus folgte eine maximale Dichte von $1,26\text{ gU/cm}^3$. Diese Daten stammen aus experimentellen und theoretischen Untersuchungen der ehemaligen deutschen Brennelementhersteller Nuklear-Chemie und Metallurgie GmbH (NUKEM) und Reaktor-Brennelement Union GmbH (RBU), wurden für die hier wiedergegebenen Rechnungen aber durch Daten neueren Datums ersetzt /MEL 07/.

In /BRO 71/ wird für das Fällprodukt beim Konversionsprozess eine weitere Summenformel für AUC angegeben: $(\text{NH}_4)_4[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]_9$. Für diese Zusammensetzung würden sich kleinere kritische Massen und Dimensionen ergeben.

Die Daten der Kurvenblätter in Abb. 1.G.1 bis Abb. 1.G.8 aus dem Jahr 2018 wurden wie die neu gerechneten Daten in Kapitel 1.F mit dem Code XSDRN der Steuersequenz CSAS1 aus dem Programmsystem SCALE 6.2.2 /REA 17/ im "search"-Modus erzeugt. Zur Berechnung wurden nukleare Querschnittsdaten aus der 252-Gruppen-Bibliothek v7-252 verwendet, die auf den ENDF/B-VII.1-Daten /CHA 11/ basieren. Diese neu berechneten Werte der Kritika-

litätsparameter liegen für sämtliche Anreicherungen nahe oder unterhalb derjenigen Werte, welche in der vorhergehenden Fassung der Datensammlung enthalten waren. Für kritische Kugelmassen und Kugelvolumina liegen die neuen Werte für die damals gerechneten ²³⁵U-Anreicherungen 4, 5, 10 und 100 Gew% etwa 10 % unterhalb der Kurven aus dem Jahr 1974. Für kritische Zylinderdurchmesser und Schichtdicken liegen die neuen Werte zwischen 0 % und 5 % unterhalb der Kurven aus dem Jahr 1974. Die Kurven der infiniten Multiplikationsfaktoren liegen 0 % bis 2 % überhalb der historischen Rechnungen. Während die kleinsten kritischen Urankonzentrationen bis auf wenige Promille übereinstimmen, schwankt der infinite Multiplikationsfaktor in Abhängigkeit der Anreicherung um ± 1 %.

Aus den angegebenen Kritikalitätsdaten können durch Anwendung der in Band 1 aufgeführten Sicherheitsfaktoren sichere Werte für Masse, Volumen und geometrische Abmessungen abgeleitet werden. Tab. 1.G.A und Tab. 1.G.B bringen eine Zusammenfassung kleinster kritischer und sicherer Daten.

Experimentell ermittelte Kritikalitätsdaten für AUC liegen nicht vor. Die eingesetzte Rechenmethodik hatte sich seinerzeit jedoch bei der Nachrechnung der sehr ähnlichen Uranylinitratlösungen hoher und niedriger Anreicherung bewährt.

Tab. 1.G.A Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene sphärische $(\text{NH}_4)_4\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$ -Wasser-Systeme bei reaktivster Urankonzentration

Anreicherung [Gew% ^{235}U]	Masse [kg U]		Volumen [Liter]	
	kritisch	sicher ¹	kritisch	sicher ¹
2	∞	∞	∞	∞
2,5	∞	∞	∞	∞
3	∞	∞	∞	∞
3,5	949	266	736	367
4	344	114	268	159
4,5	188	66,5	152	96,6
5	123	44,8	104	68,3
5,5	88,1	32,8	78,5	52,6
6	67,3	25,5	63,0	42,9
7	44,4	17,1	45,6	31,6
8	32,3	12,6	36,2	25,4
10	20,2	7,99	26,4	18,7
25	4,65	1,88	11,8	8,58
50	1,89	0,772	8,26	6,04
100	0,827	0,339	5,84	4,28

¹ Sicherheitsfaktoren:

Sichere Masse $\leq 45\%$ der kritischen Masse **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

Sicheres Volumen $\leq 80\%$ des kritischen Volumens **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

Tab. 1.G.B Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene $(\text{NH}_4)_4\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$ -Wasser-Systeme in Zylinder- und Schichtgeometrie bei reaktivster Urankonzentration

Anreicherung [Gew% ^{235}U]	Durchmesser eines infiniten Zylinders [cm]		Dicke einer infiniten Schicht [cm]	
	kritisch	sicher ¹	kritisch	sicher ¹
2	∞	∞	∞	∞
2,5	∞	∞	∞	∞
3	∞	∞	∞	∞
3,5	82,9	63,4	49,9	37,6
4	58,4	47,4	33,9	27,1
4,5	47,9	39,7	27,0	22,1
5	41,8	35,1	23,1	19,1
5,5	37,8	32,0	20,5	17,1
6	35,0	29,7	18,6	15,6
7	31,1	26,6	16,1	13,5
8	28,6	24,5	14,4	12,2
10	25,4	21,9	12,3	10,4
25	18,7	16,3	7,87	6,68
50	16,3	14,2	6,23	5,27
100	14,2	12,4	4,85	4,04

¹ Sicherheitsfaktoren:

Sichere Dimension $\leq 90\%$ der kritischen Dimension **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

23.01.2018

U235-AUC-HOM

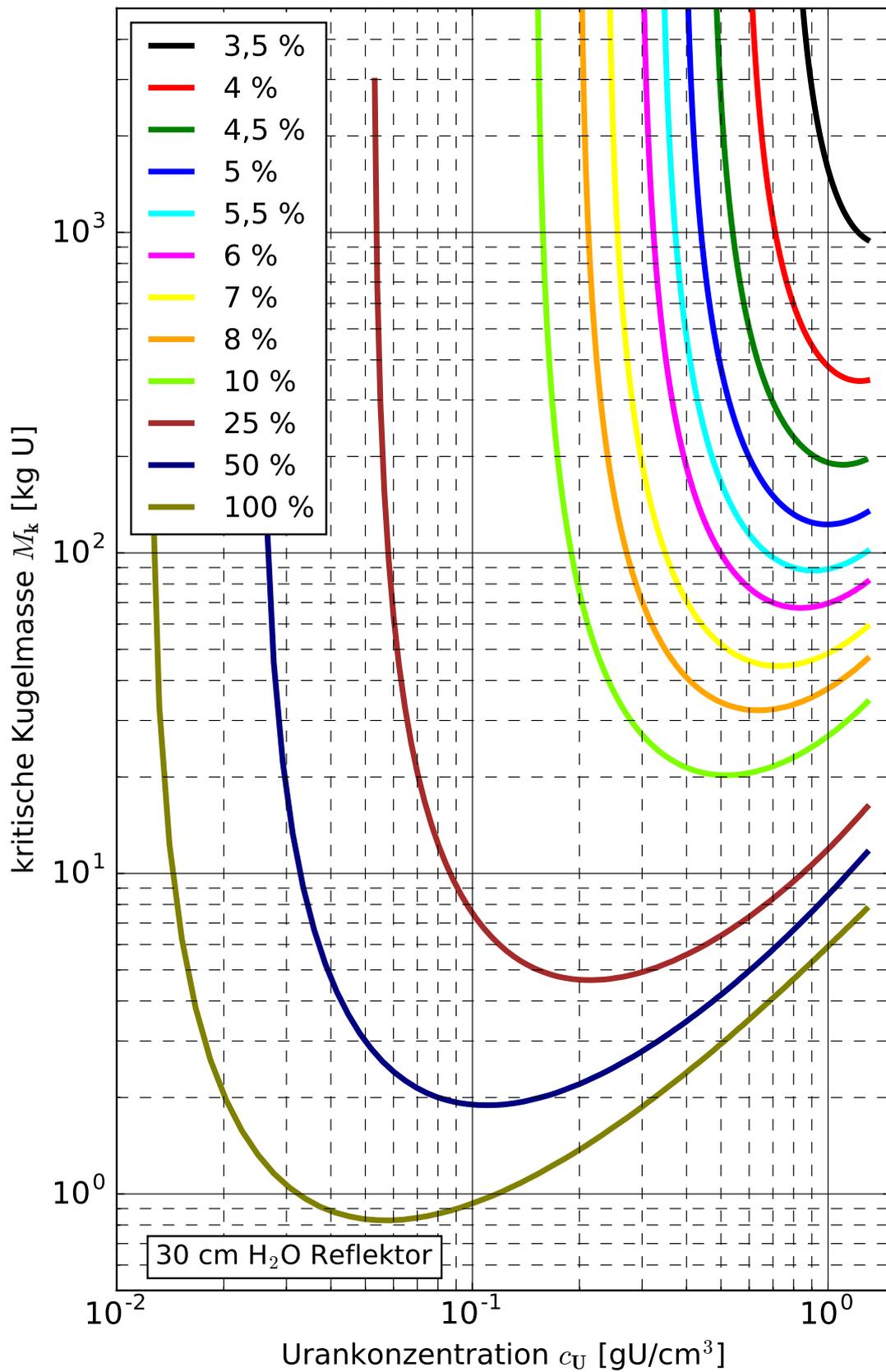


Abb. 1.G.1 Kritische Kugelmasse von homogenen AUC-Wasser-Systemen

23.01.2018

U235-AUC-HOM

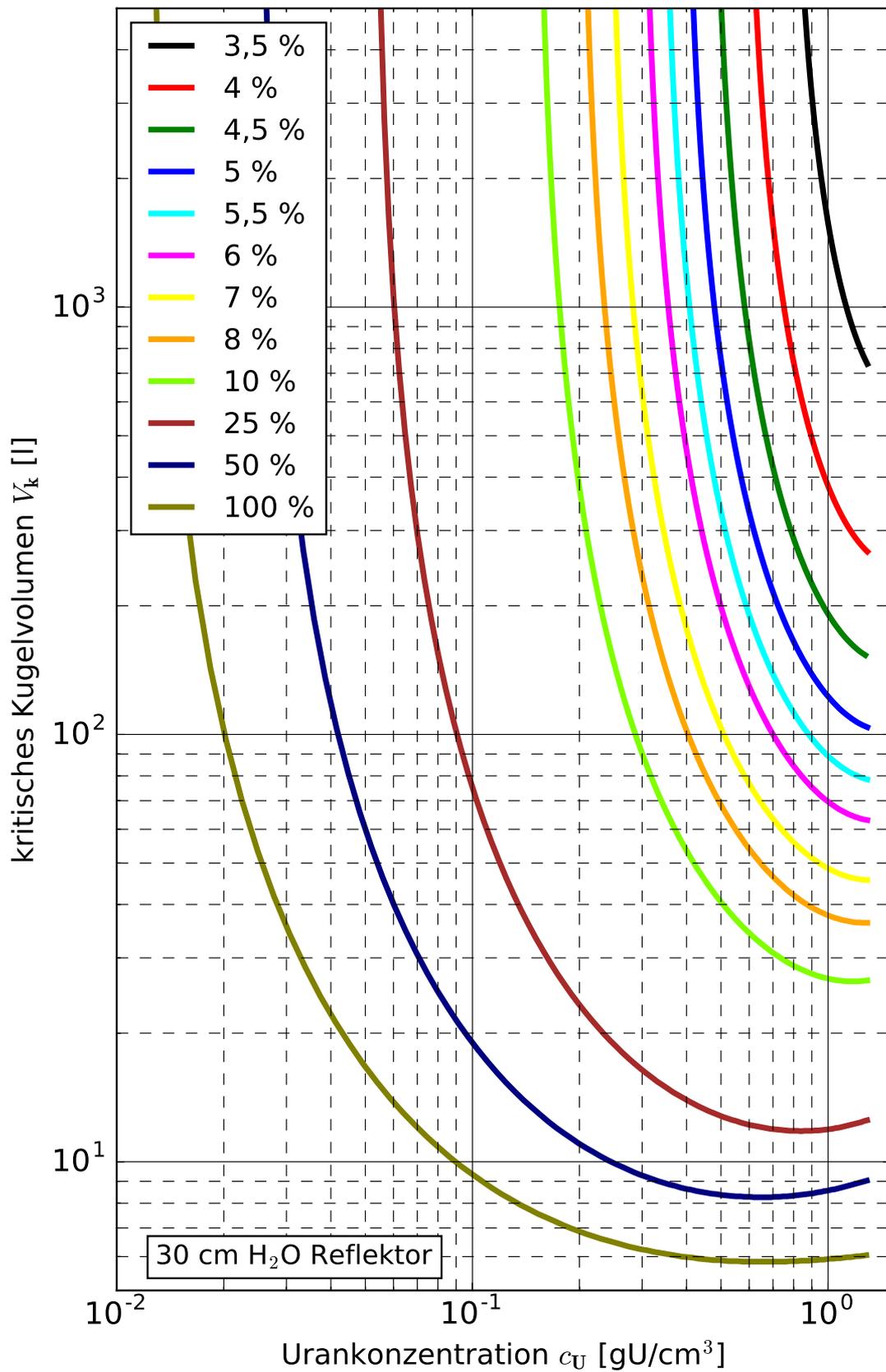


Abb. 1.G.2 Kritisches Kugelvolumen von homogenen AUC-Wasser-Systemen

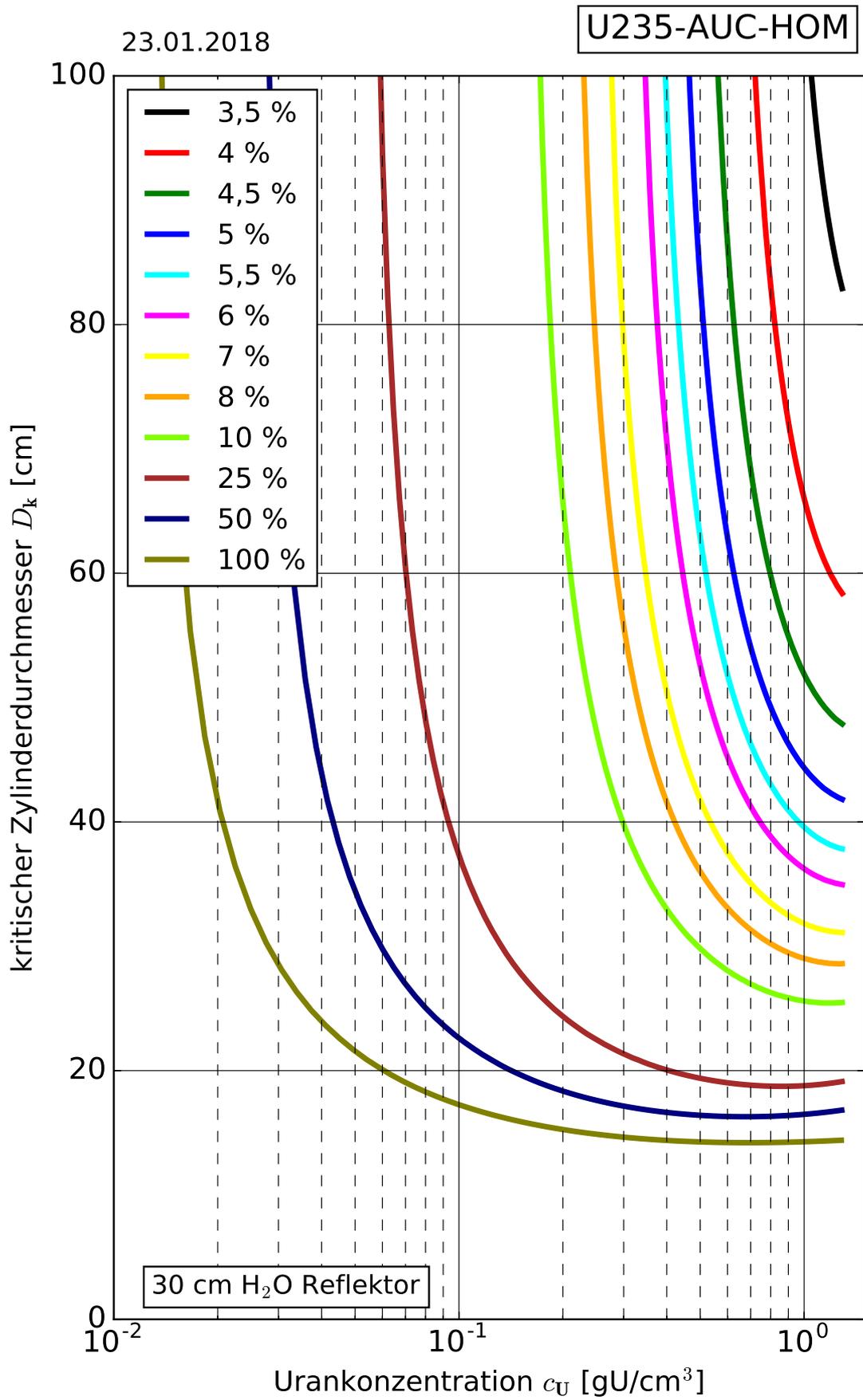


Abb. 1.G.3 Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen AUC-Wasser-Systemen

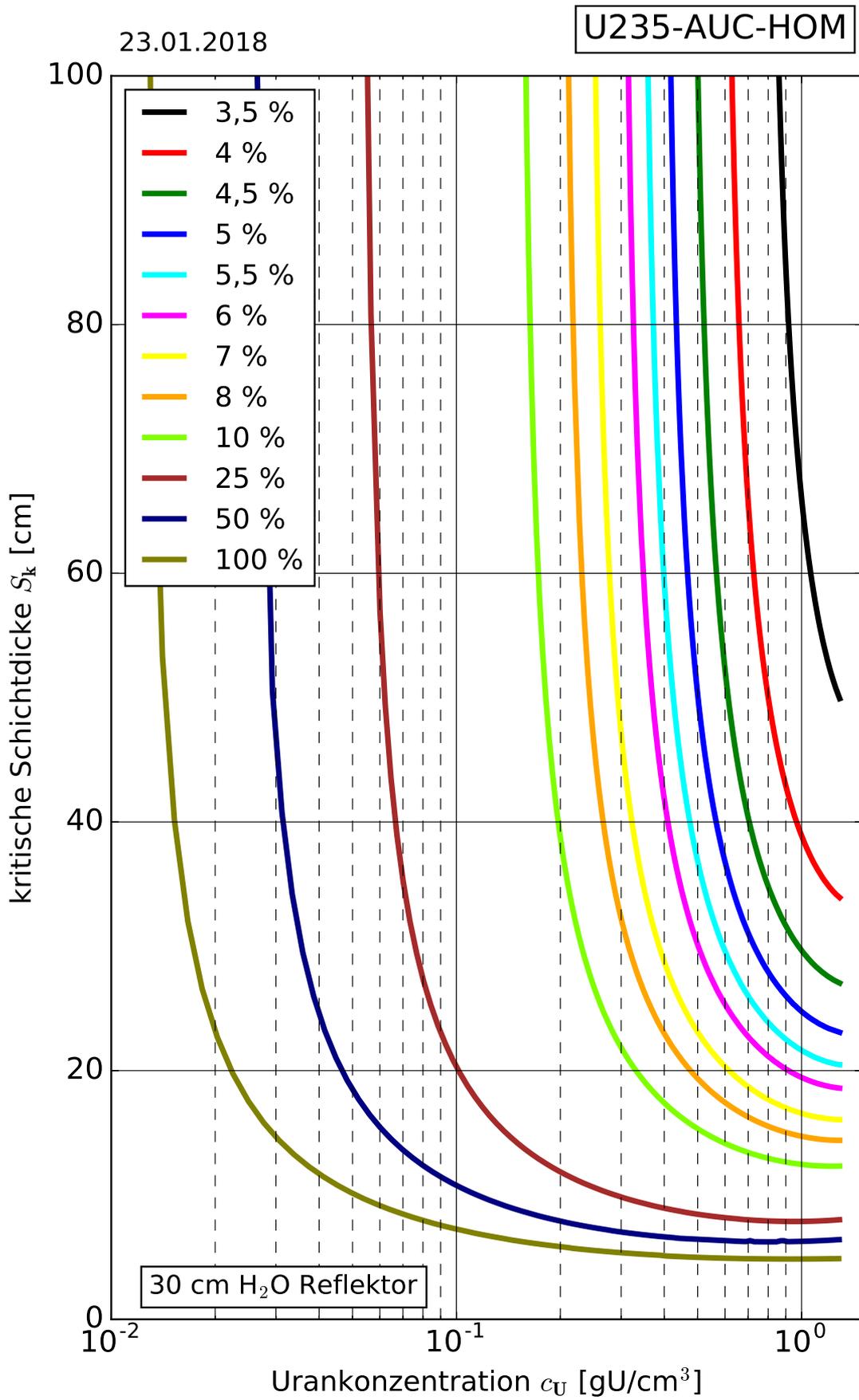


Abb. 1.G.4 Kritische Schichtdicke von homogenen AUC-Wasser-Systemen

23.01.2018

U235-AUC-HOM

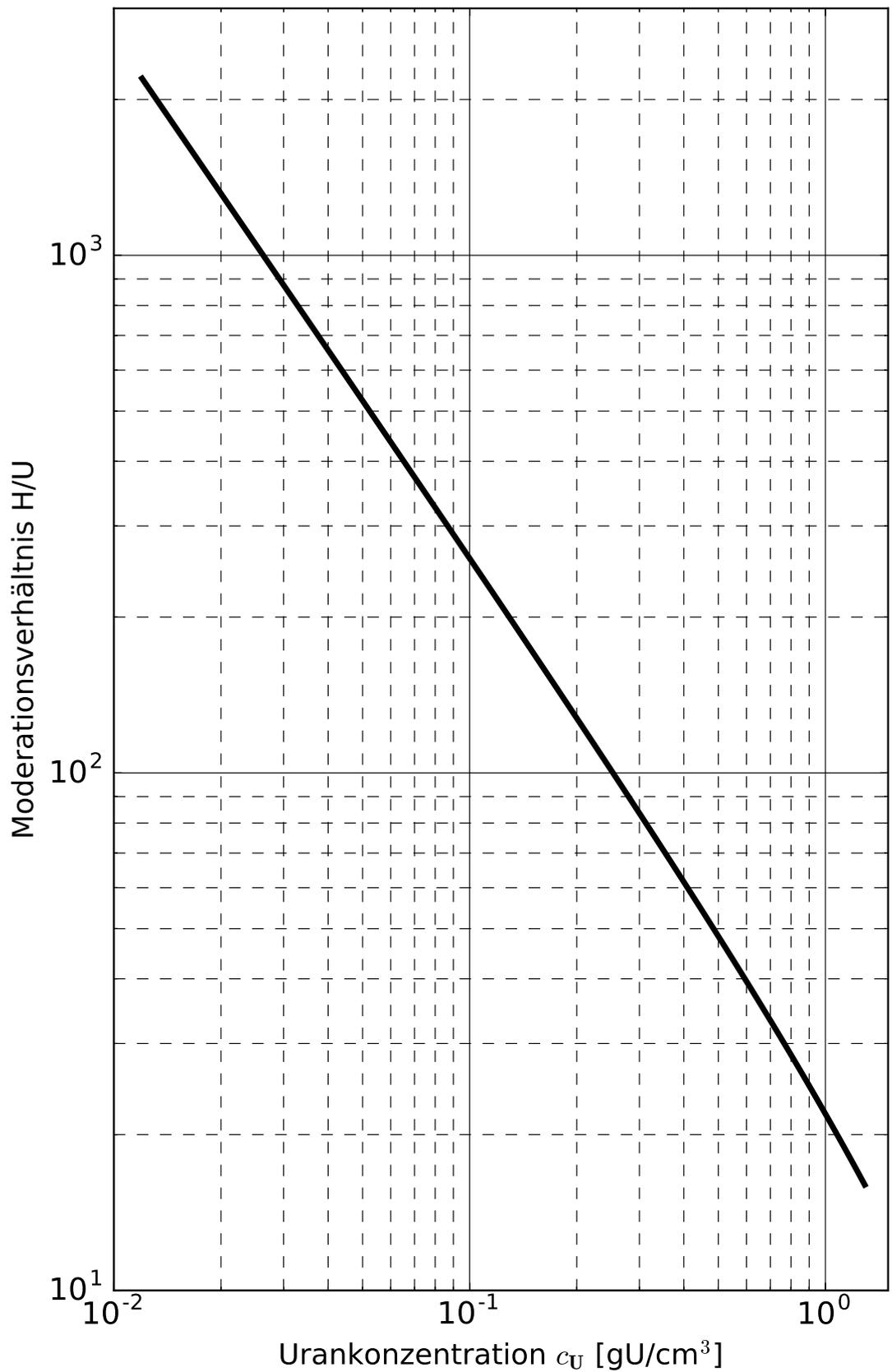


Abb. 1.G.5 Moderationsverhältnis von homogenen AUC-Wasser-Systemen

23.01.2018

U235-AUC-HOM

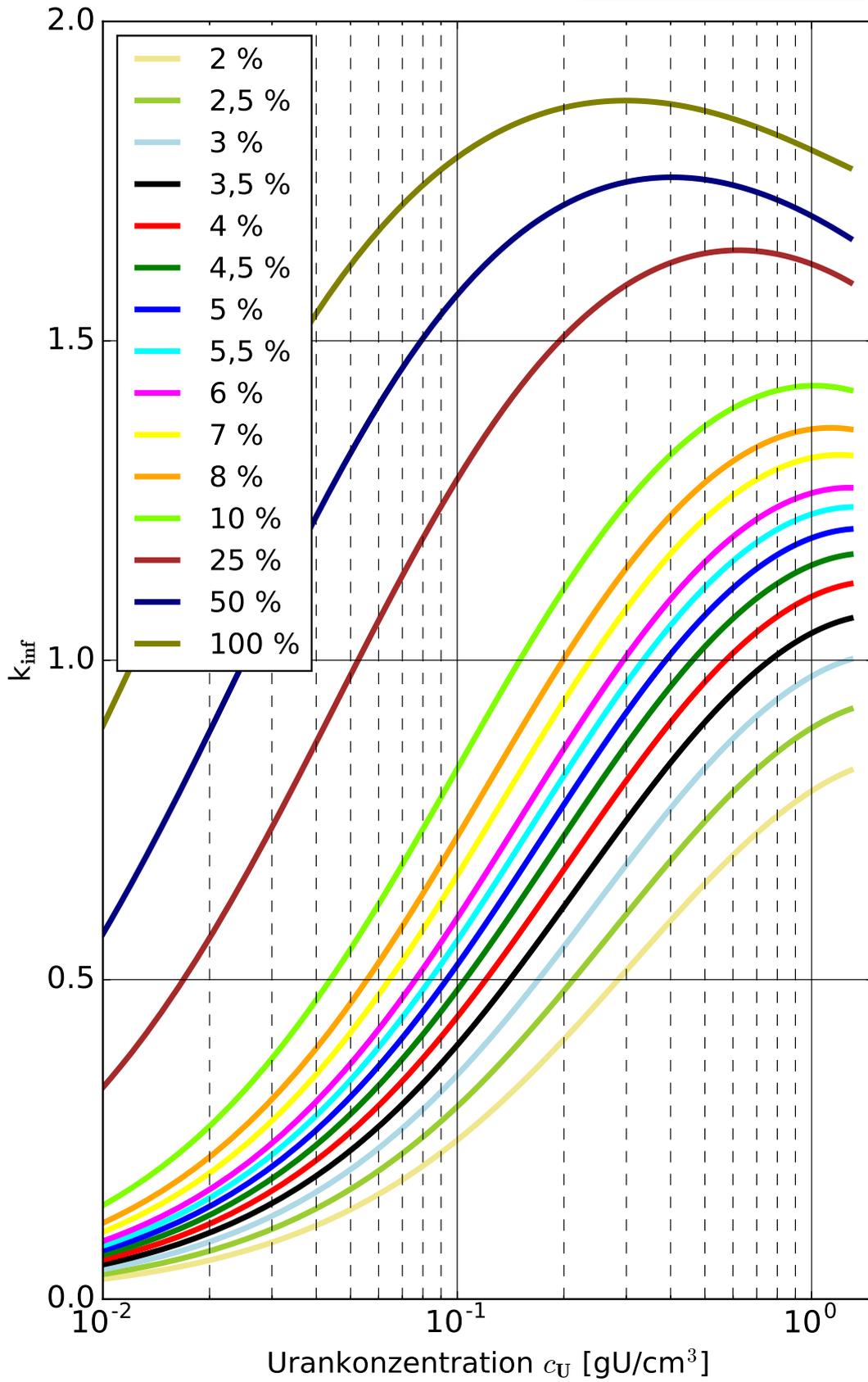


Abb. 1.G.6 Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen AUC-Wasser-Systemen

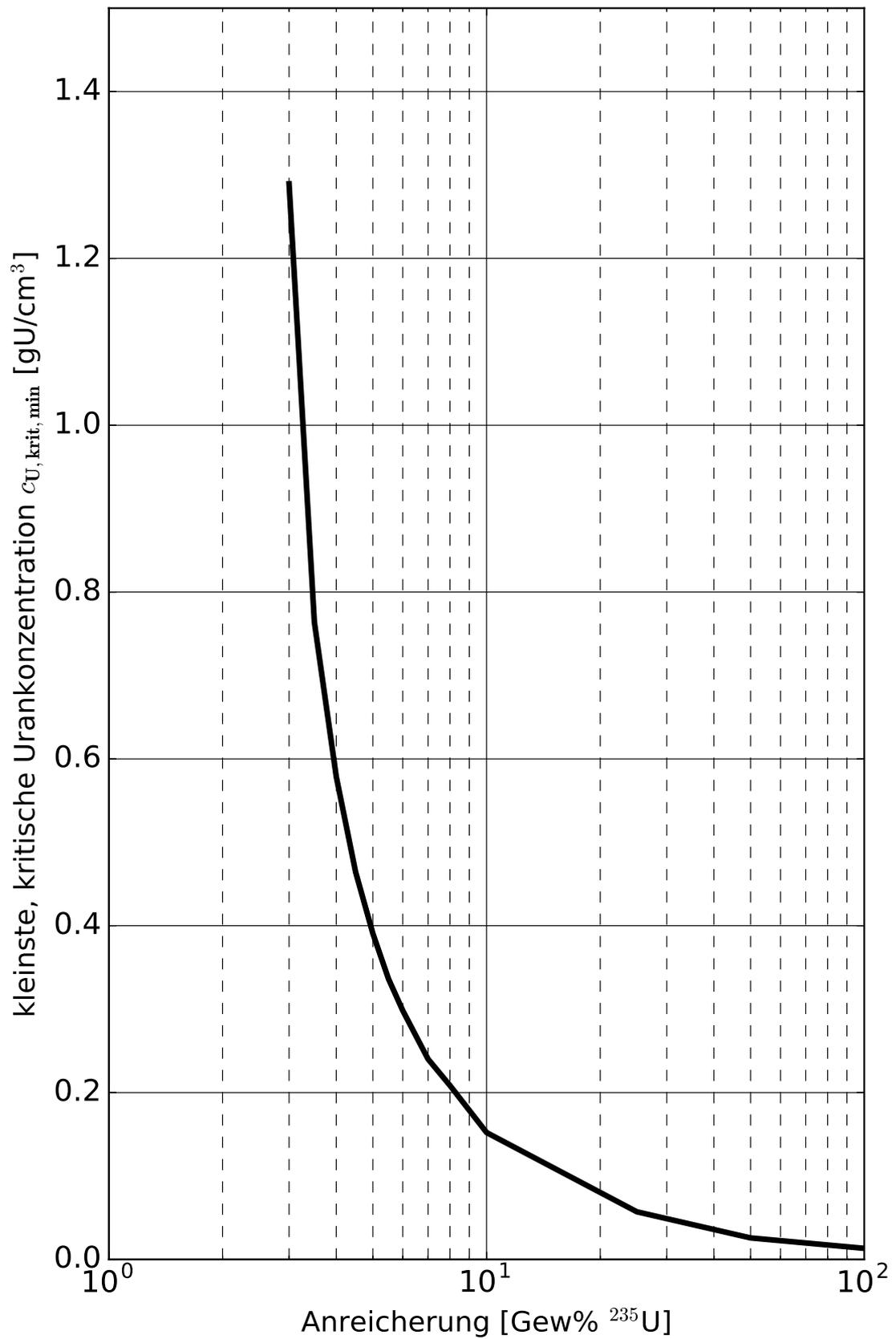


Abb. 1.G.7 Kleinste kritische Konzentration von homogenen AUC-Wasser-Systemen

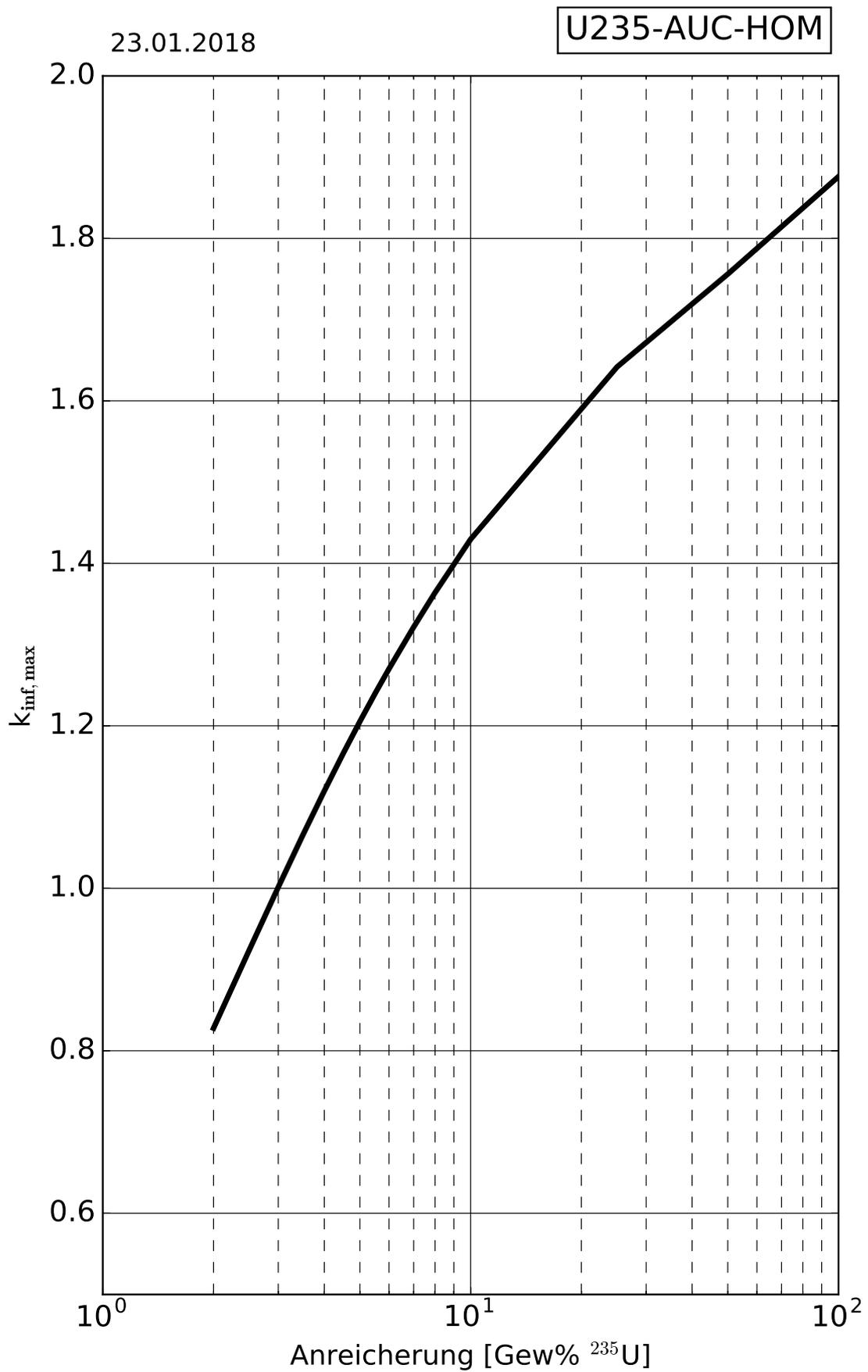


Abb. 1.G.8 Maximaler infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen AUC-Wasser-Systemen

1.H Homogene ADU-Wasser-Systeme

Die folgenden Tabellen und Kurvenblätter enthalten Kritikalitätsparameter für Ammoniumdiuranat-Systeme (ADU) verschiedener ^{235}U -Anreicherungen von 2 bis 100 Gew%. Diese ist jeweils als Parameter für die entsprechende Kurve angegeben. Sämtliche kritische Werte gelten für voll wasserreflektierte Systeme (30 cm Wasserreflektor der Dichte 1 g/cm^3).

Ammoniumdiuranat (ADU) ist wie Ammoniumuranylcarbonat ein wichtiges Zwischenprodukt bei der nassen Konversion von Uranhexafluorid zu Urandioxid. ADU hat die chemische Zusammensetzung $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$. Es wird von einer theoretischen Dichte der Verbindung von $4,97\text{ gU/cm}^3$ ausgegangen /JAN 72/, was einer maximalen Urankonzentration von $3,79\text{ gU/cm}^3$ entspricht. Dieser Wert liegt nahe dem in /SHO 95/ angegebenen Wert von $4,83\text{ g/cm}^3$ für eine leicht unterschiedliche Summenformel von ADU: $3\text{UO}_3 \cdot \text{NH}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

Die Daten der Kurvenblätter in Abb. 1.H.1 bis Abb. 1.H.8 aus dem Jahr 2018 wurden wie die neu gerechneten Daten in Kapitel 1.F und Kapitel 1.G mit dem Code XSDRN der Steuersequenz CSAS1 aus dem Programmsystem SCALE 6.2.2 /REA 17/ im "search"-Modus erzeugt. Zur Berechnung wurden nukleare Querschnittsdaten aus der 252-Gruppen-Bibliothek v7-252 verwendet, die auf den ENDF/B-VII.1-Daten /CHA 11/ basieren. Wie bei Uranylinitrat und AUC gibt es auch bei ADU keine direkt vergleichbaren Experimente.

Für die neuen Rechnungen im Vergleich mit den historischen Rechnungen ergibt sich eine geringere Urankonzentrationen und kleinere kritische Werte von bis zu 30 % bei kleinen ^{235}U -Anreicherungen (2,0 Gew%) für das kritische Kugelvolumen um das Kritikalitätsminium. Aufgrund der höher angenommenen Dichte von ADU (historische Annahme: $3,96\text{ g/cm}^3$) ist ein solcher Unterschied zu erwarten. Für höhere Anreicherungen sind die Unterschiede geringer und liegen bei 10-15%. Die infiniten Multiplikationsfaktoren liegen 0-5 % über den historischen Rechnungen. Zusätzlich verschieben sich die Minima leicht zu höheren Konzentrationen. In der Praxis kann die jeweils vorliegende Zusammensetzung vom chemischen Milieu und von der Temperatur abhängen. Dies ist bei der Verwendung der hier angegebenen Kritikalitätsdaten zu beachten.

Aus den angegebenen Kritikalitätsparametern können durch Anwendung der in Band 1 aufgeführten Sicherheitsfaktoren sichere Werte für Masse, Volumen und geometrische Abmessungen abgeleitet werden. Tab. 1.H.A und Tab. 1.H.B bringen eine Zusammenfassung kleinster kritischer und sicherer Daten.

Tab. 1.H.A Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene sphärische ADU-Wasser-Systeme bei reaktivster Urankonzentration

Anreicherung [Gew% ²³⁵ U]	Masse [kg U]		Volumen [Liter]	
	kritisch	sicher ¹	kritisch	sicher ¹
2	1030	325	435	250
2,5	332	118	163	105
3	174	64,7	96,4	64,5
3,5	111	42,3	68,1	46,6
4	79,5	30,6	53,0	36,7
4,5	60,7	23,6	43,7	30,5
5	48,5	19,0	37,4	26,3
5,5	40,1	15,8	33,0	23,3
6	34,0	13,4	29,6	21,0
7	25,8	10,2	25,0	17,8
8	20,6	8,21	21,9	15,7
10	14,5	5,81	18,0	13,0
25	4,15	1,69	10,3	7,52
50	1,79	0,733	7,76	5,68
100	0,807	0,331	5,68	4,17

¹ Sicherheitsfaktoren:

Sichere Masse $\leq 45\%$ der kritischen Masse **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

Sicheres Volumen $\leq 80\%$ des kritischen Volumens **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

Tab. 1.H.B Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene ADU-Wasser-Systeme in Zylinder- und Schichtgeometrie bei reaktivster Urankonzentration

Anreicherung [Gew% ²³⁵ U]	Durchmesser eines infiniten Zylinders [cm]		Dicke einer infiniten Schicht [cm]	
	kritisch	sicher ¹	kritisch	sicher ¹
2	68,7	55,0	39,9	31,6
2,5	48,6	40,5	26,9	22,1
3	40,3	34,0	21,5	17,9
3,5	35,6	30,2	18,5	15,5
4	32,5	27,7	16,5	13,9
4,5	30,3	25,9	15,1	12,7
5	28,6	24,6	14,0	11,8
5,5	27,3	23,5	13,1	11,1
6	26,2	22,6	12,5	10,6
7	24,6	21,2	11,4	9,69
8	23,4	20,2	10,7	9,05
10	21,8	18,9	9,61	8,15
25	17,6	15,3	6,89	5,84
50	15,8	13,7	5,69	4,78
100	13,9	12,1	4,09	3,41

¹ Sicherheitsfaktoren:

Sichere Dimension $\leq 90\%$ der kritischen Dimension **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

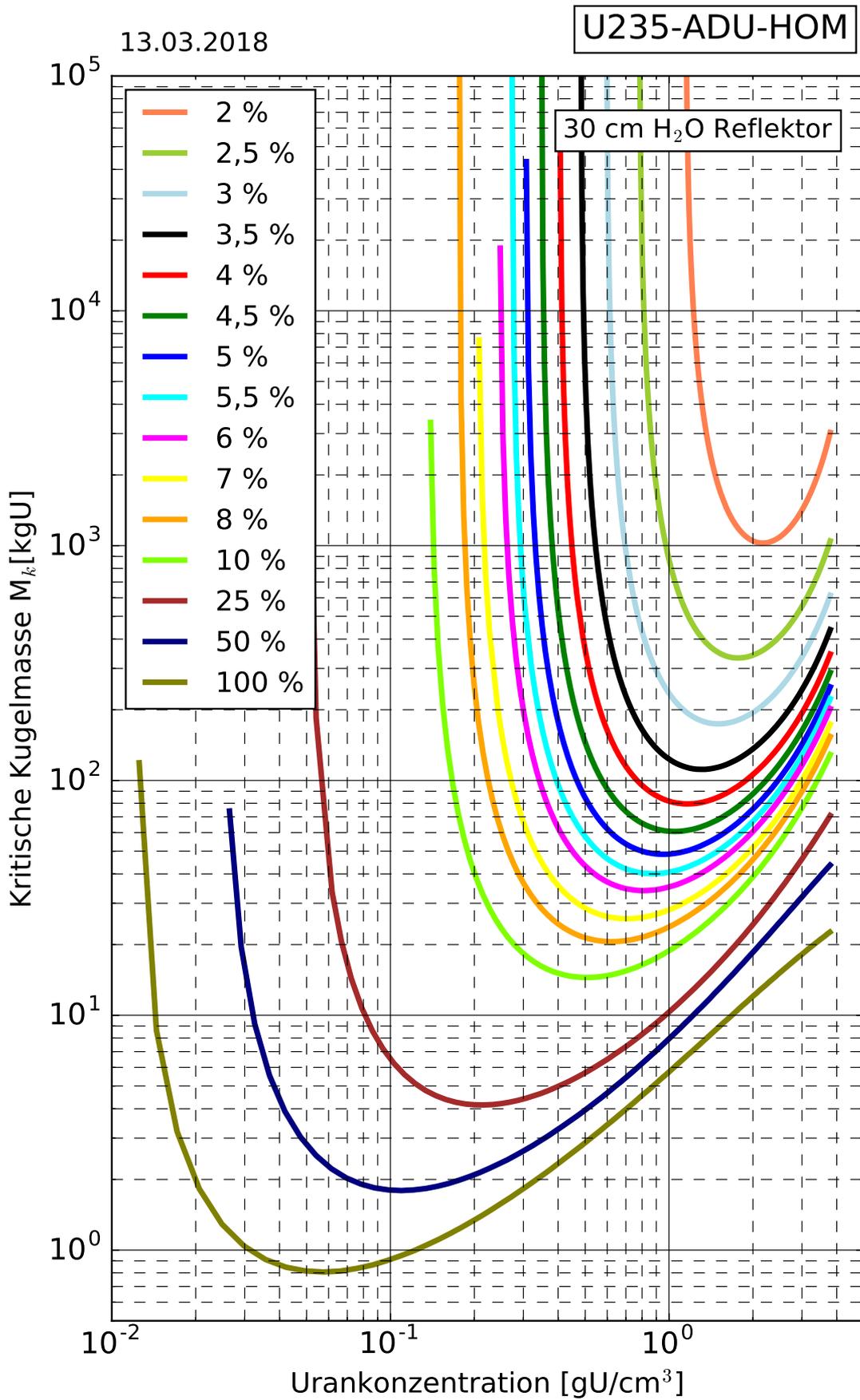


Abb. 1.H.1 Kritische Kugelmasse von homogenen ADU-Wasser-Systemen

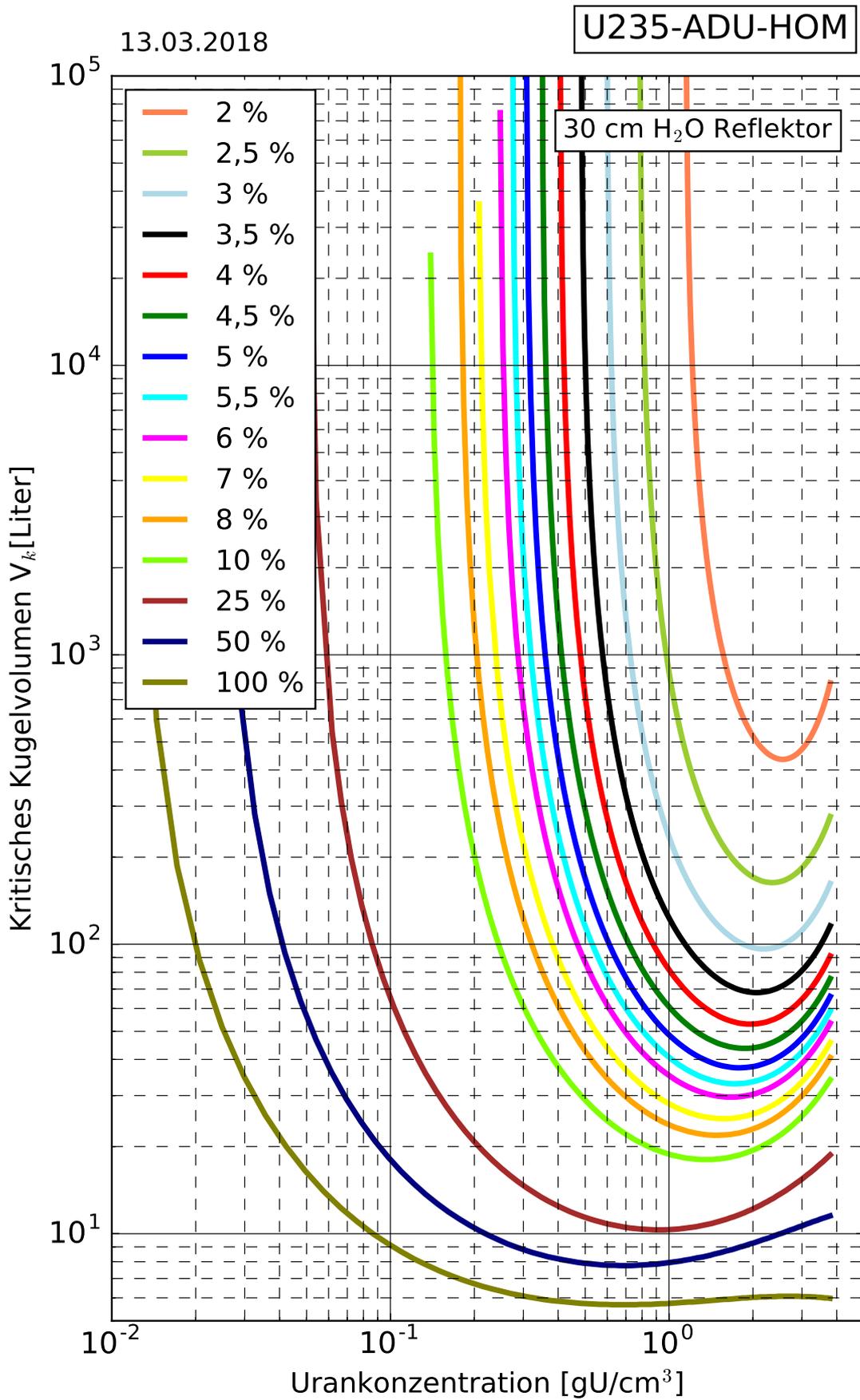


Abb. 1.H.2 Kritisches Kugelvolumen von homogenen ADU-Wasser-Systemen

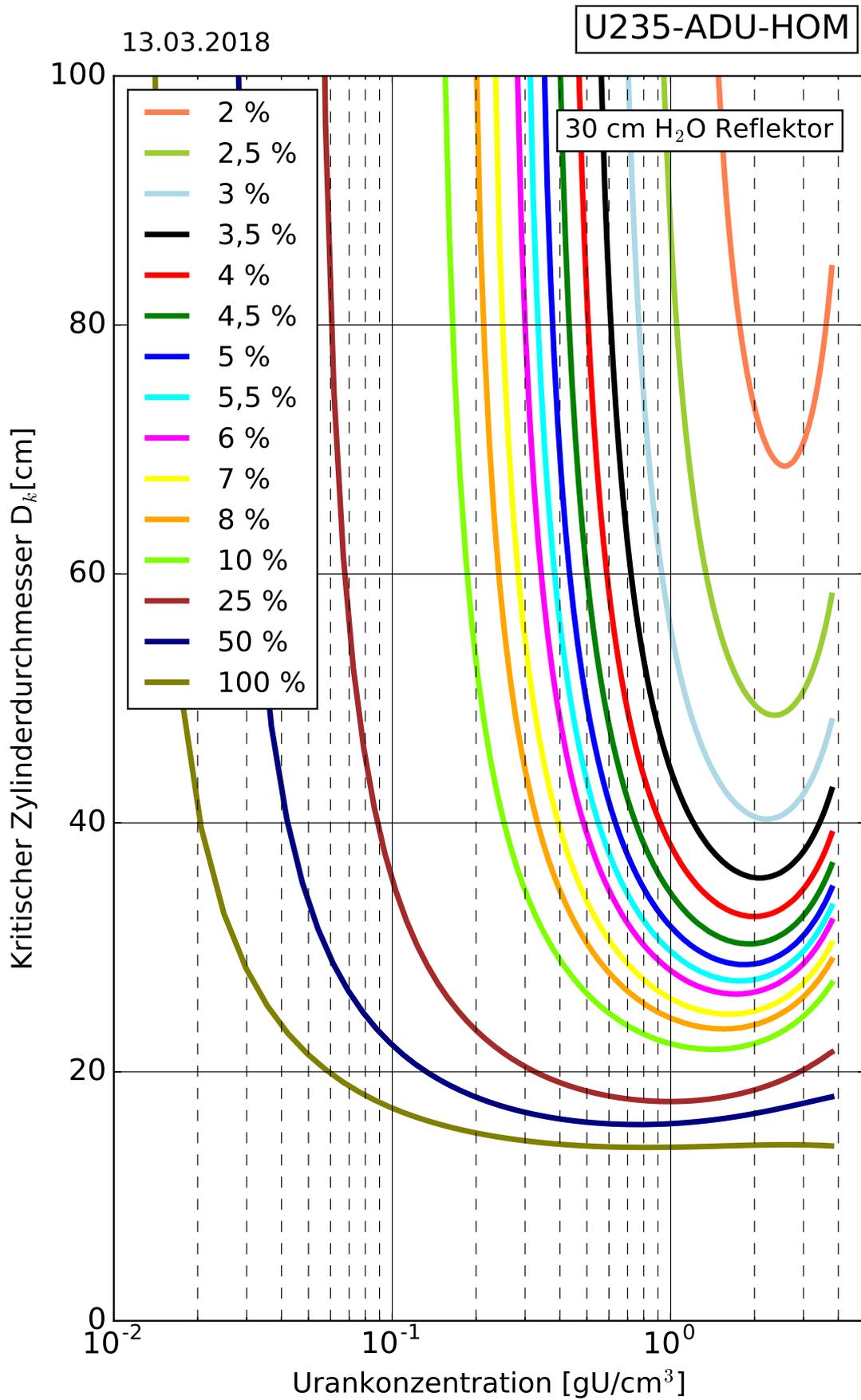


Abb. 1.H.3 Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen ADU-Wasser-Systemen

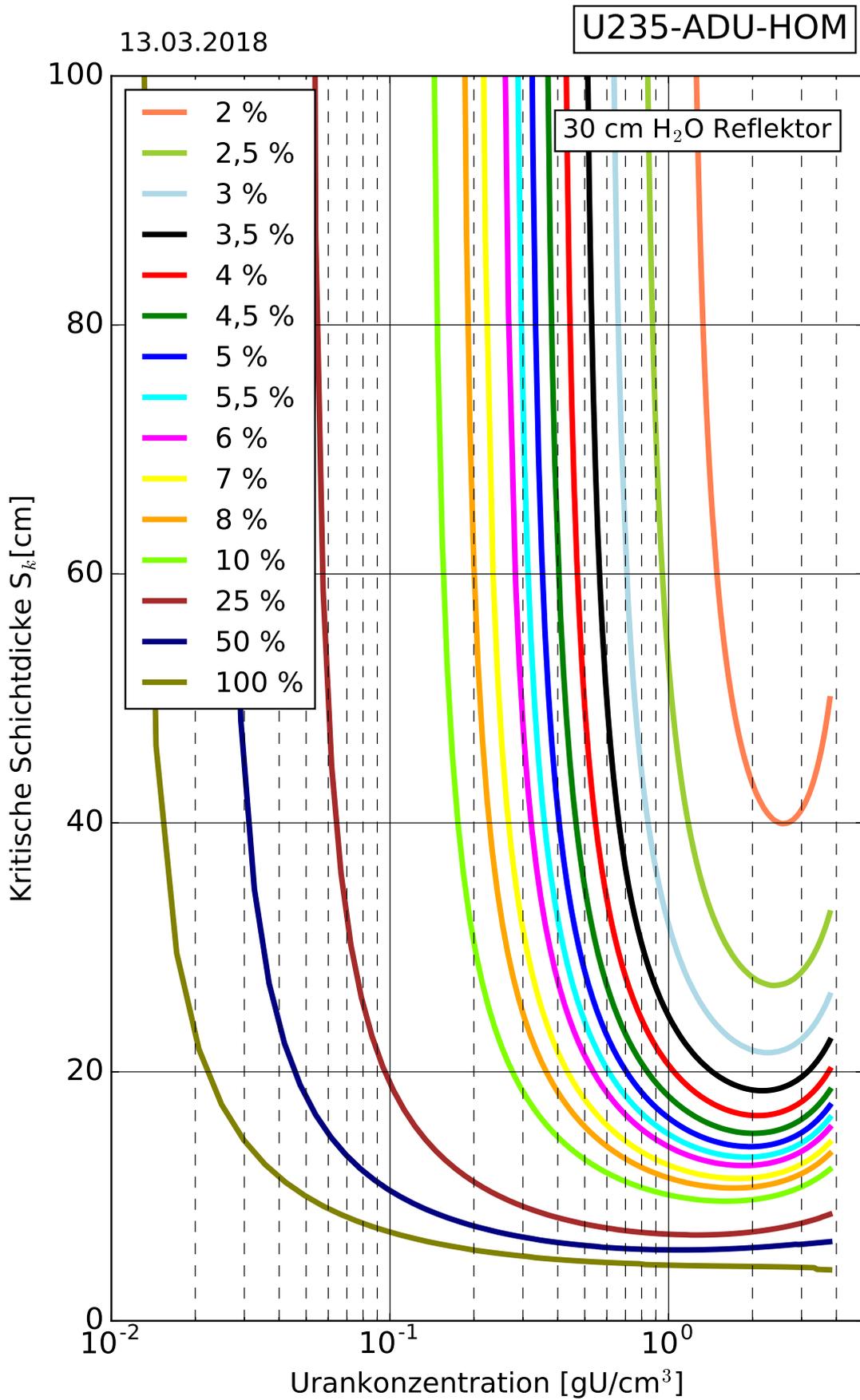


Abb. 1.H.4 Kritische Schichtdicke von homogenen ADU-Wasser-Systemen

13.03.2018

U235-ADU-HOM

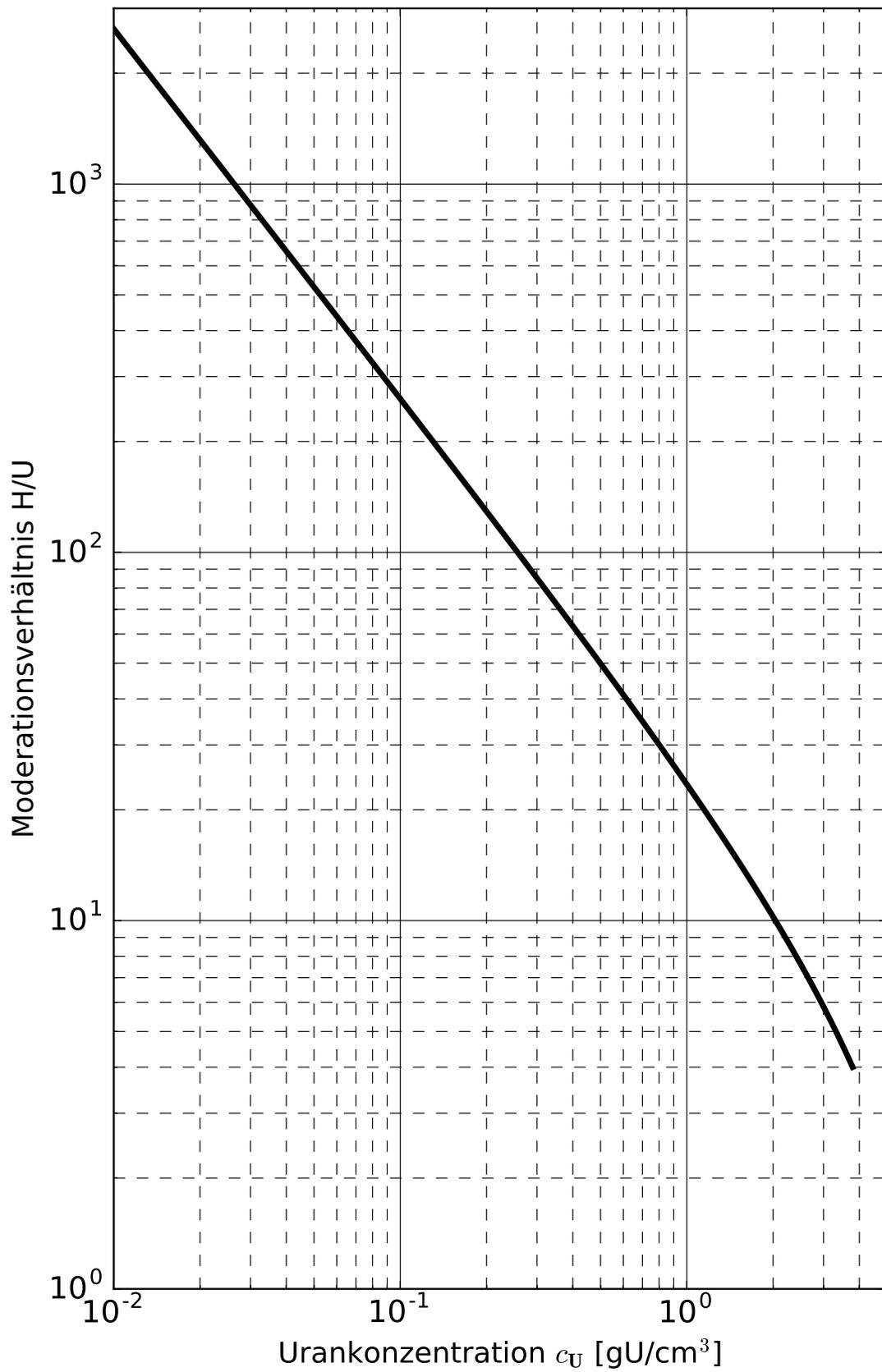


Abb. 1.H.5 Moderationsverhältnis von homogenen ADU-Wasser-Systemen

13.03.2018

U235-ADU-HOM

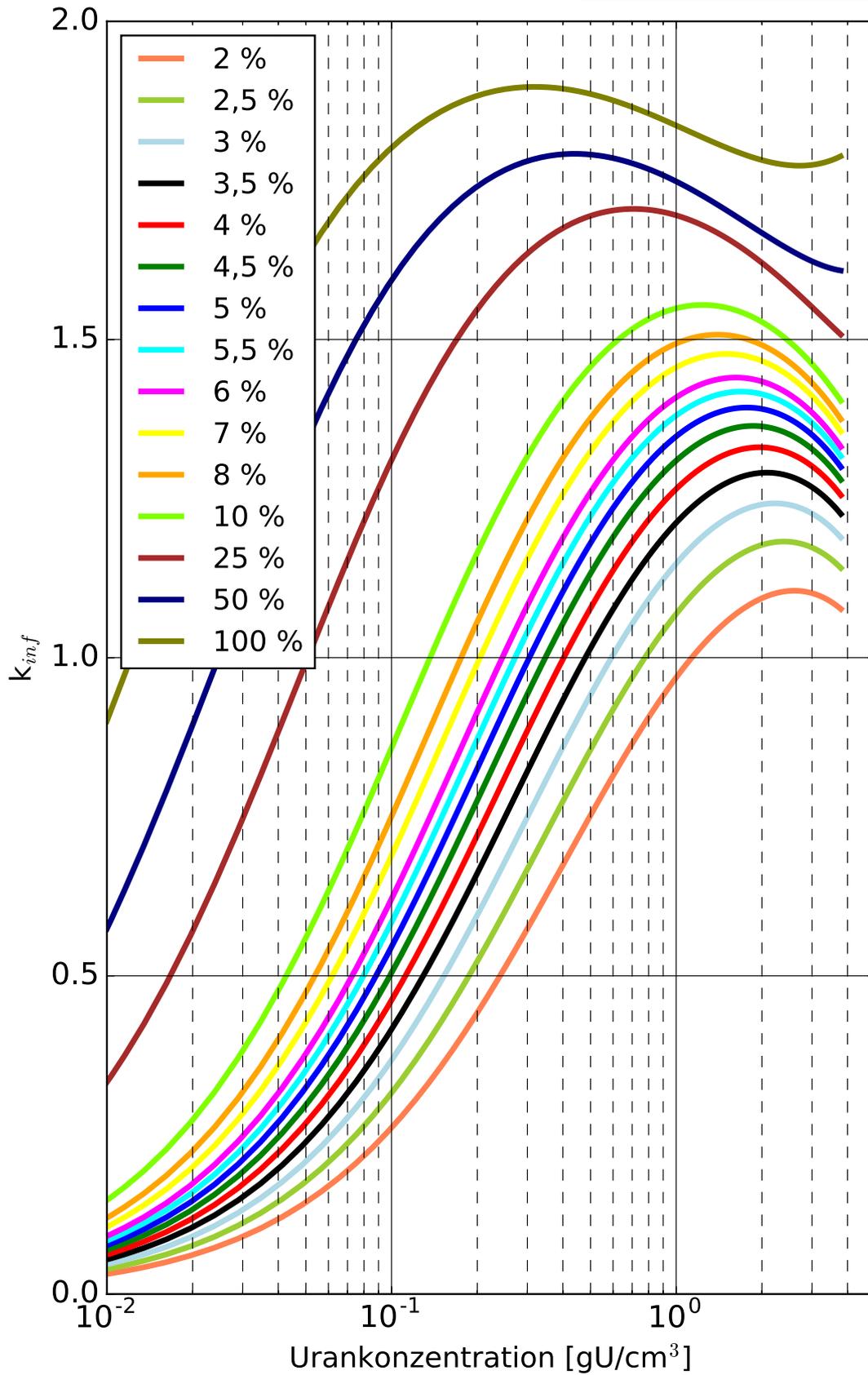


Abb. 1.H.6 Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen ADU-Wasser-Systemen

13.03.2018

U235-ADU-HOM

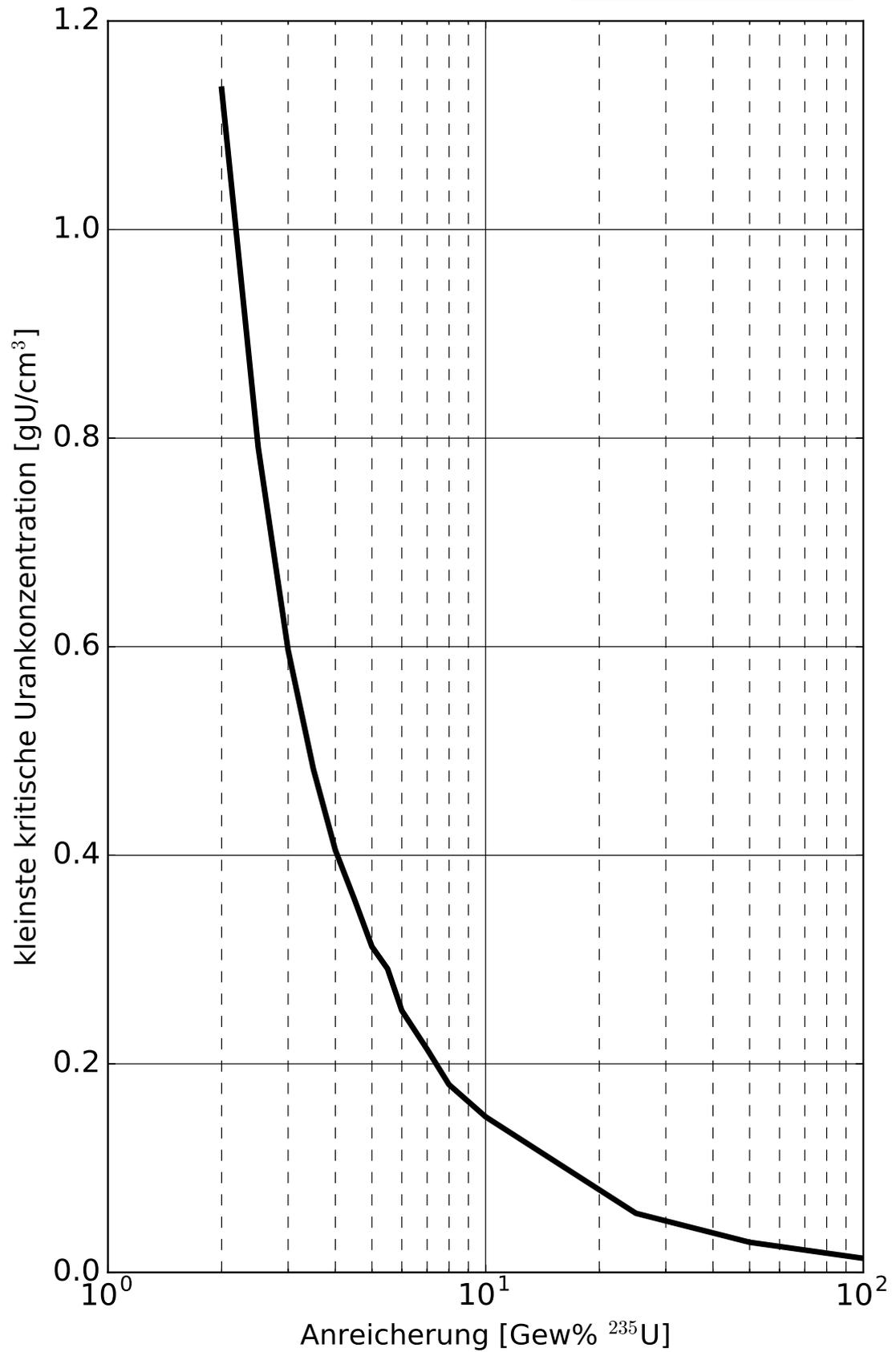


Abb. 1.H.7 Kleinste kritische Urankonzentration von homogenen ADU-Wasser-Systemen

13.03.2018

U235-ADU-HOM

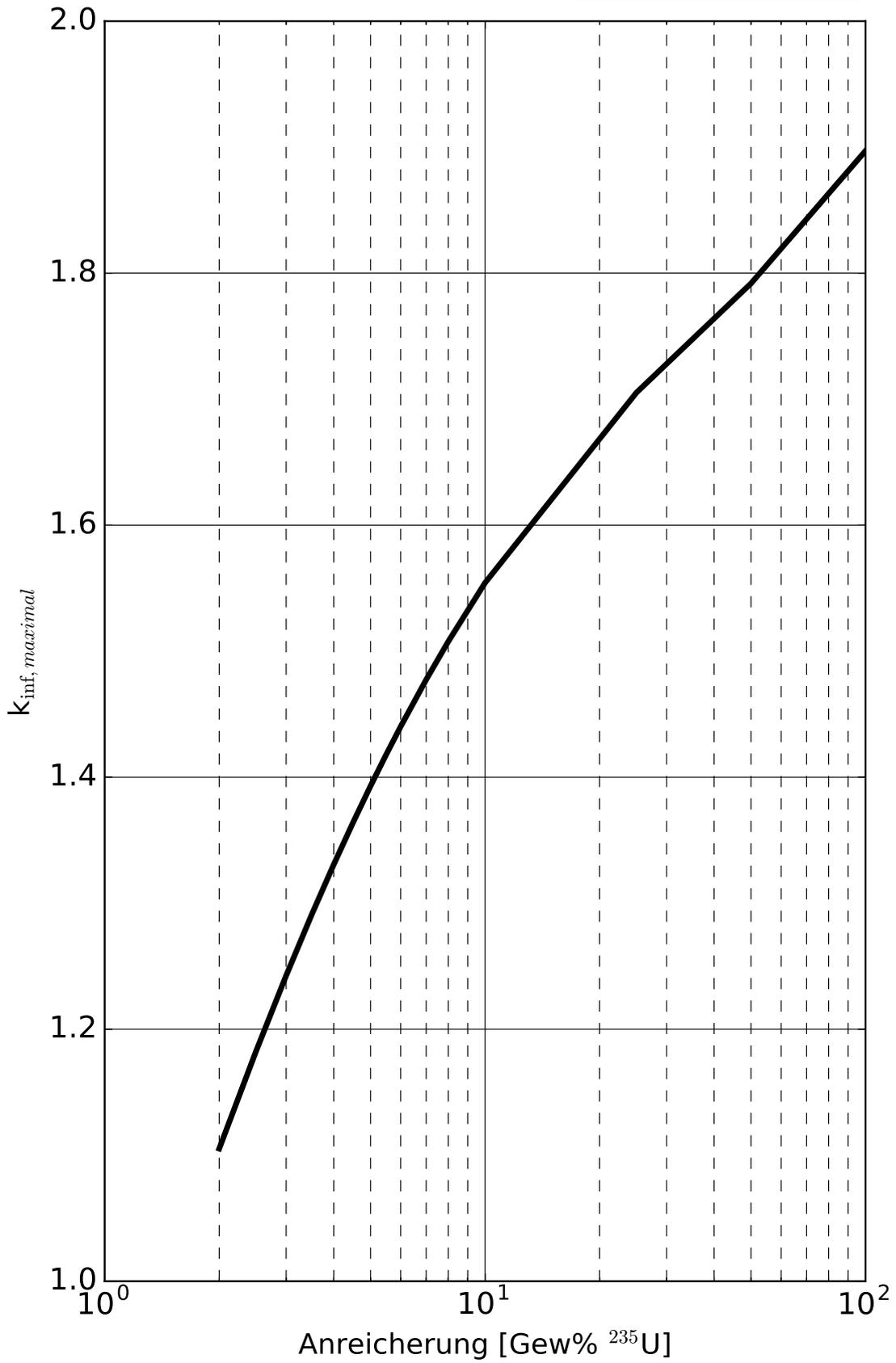


Abb. 1.H.8 Maximaler infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen ADU-Wasser-Systemen

1.1 Homogene Uran(VI)oxid-Wasser-Systeme

Die folgenden Tabellen und Kurvenblätter enthalten Kritikalitätsparameter für Uran(VI)oxid-Systeme (UO_3) bei verschiedenen ^{235}U -Anreicherungen von 2,0 bis 100 Gew%. Diese ist jeweils als Parameter bei den Kurven angegeben. Sämtliche kritische Werte gelten für voll wasserreflektierte Systeme (30 cm Wasserreflektor).

Bei der Herstellung von Urandioxid-Pulver aus Uranhexafluorid nach dem AUC-Verfahren entsteht u. a. als Zwischenprodukt UO_3 in Form von Suspensionen in wässriger Lösung. Je nach Darstellung von UO_3 entstehen unterschiedliche amorphe bzw. kristalline Modifikationen mit Dichten von $6,69\text{ g/cm}^3$ für δUO_3 bis $8,62\text{ g/cm}^3$ für ξUO_3 /SPR 18/. Für die Kritikalitätsdaten wurde die Dichte von trockenem, orthogonalem UO_3 von $8,45\text{ g/cm}^3$ verwendet, was einer maximalen Urankonzentration von $7,03\text{ gU/cm}^3$ entspricht.

Die Daten wurden wie in Kapitel 1.F, Kapitel 1.G und Kapitel 1.H mit dem Code XSDRN der Steuersequenz CSAS1 aus dem Programmsystem SCALE 6.2.2 /REA 17/ im "search"-Modus erzeugt. Zur Berechnung wurden nukleare Querschnittsdaten aus der 252-Gruppen-Bibliothek v7-252 verwendet, die auf den ENDF/B-VII.1-Daten /CHA 11/ basieren. Wie bei Uranylнитrat, AUC und ADU gibt es auch bei UO_3 keine direkt vergleichbaren Experimente, mit denen die gerechneten Kurven validiert werden könnten.

Für die neuen Rechnungen im Vergleich mit der einzig zur Verfügung stehenden historischen Rechnung bei 5,0 Gew% ^{235}U aus den 90ern ergibt sich eine Abweichung um das Kritikalitätsminium von weniger als 2 %.

Aus den angegebenen Kritikalitätsdaten können durch Anwendung der in Band 1 aufgeführten Sicherheitsfaktoren sichere Werte für Masse, Volumen und geometrische Abmessungen abgeleitet werden. Tab. 1.1.A und Tab. 1.1.B bringen eine Zusammenfassung kleinster kritischer und sicherer Daten.

Tab. 1.I.A

Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene sphärische UO₃-Wasser-Mischungen bei reaktivster Urankonzentration

Anreicherung [Gew% ²³⁵ U]	Masse [kg U]		Volumen [Liter]	
	kritisch	sicher ¹	kritisch	sicher ¹
2	310	114	148	97,9
2,5	162	61,7	88,3	60,3
3	104	40,3	63,2	43,9
3,5	74,8	29,2	49,8	34,9
4	57,3	22,5	41,5	29,3
4,5	46,0	18,2	35,8	25,4
5	38,2	15,1	31,8	22,6
5,5	32,5	12,9	28,7	20,5
6	28,2	11,2	26,4	18,9
7	22,1	8,85	22,9	16,5
8	18,1	7,26	20,5	14,8
10	13,1	5,28	17,3	12,5
25	4,01	1,63	10,4	7,60
50	1,77	0,722	7,91	5,79
100	0,801	0,329	5,85	4,30

¹ Sicherheitsfaktoren:

Sichere Masse ≤ 45% der kritischen Masse **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

Sicheres Volumen ≤ 80% des kritischen Volumens **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

Tab. 1.I.B Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene UO₃-Wasser-Systeme in Zylinder- und Schichtgeometrie bei reaktivster Urankonzentration

Anreicherung [Gew% ²³⁵ U]	Durchmesser eines infiniten Zylinders [cm]		Dicke einer infiniten Schicht [cm]	
	kritisch	sicher ¹	kritisch	sicher ¹
2	46,8	39,4	25,5	21,2
2,5	38,9	33,1	20,5	17,2
3	34,5	29,5	17,7	14,9
3,5	31,7	27,2	15,8	13,4
4	29,6	25,5	14,5	12,3
4,5	28,1	24,2	13,5	11,5
5	26,9	23,2	12,8	10,8
5,5	25,9	22,3	12,1	10,3
6	25,1	21,7	11,6	9,87
7	23,8	20,6	10,8	9,18
8	22,8	19,7	10,2	8,67
10	21,4	18,6	9,30	7,92
25	17,7	15,3	6,89	5,86
50	15,9	13,8	5,84	4,87
100	14,1	12,3	4,30	3,57

¹ Sicherheitsfaktoren:

Sichere Dimension ≤ 90 % der kritischen Dimension **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

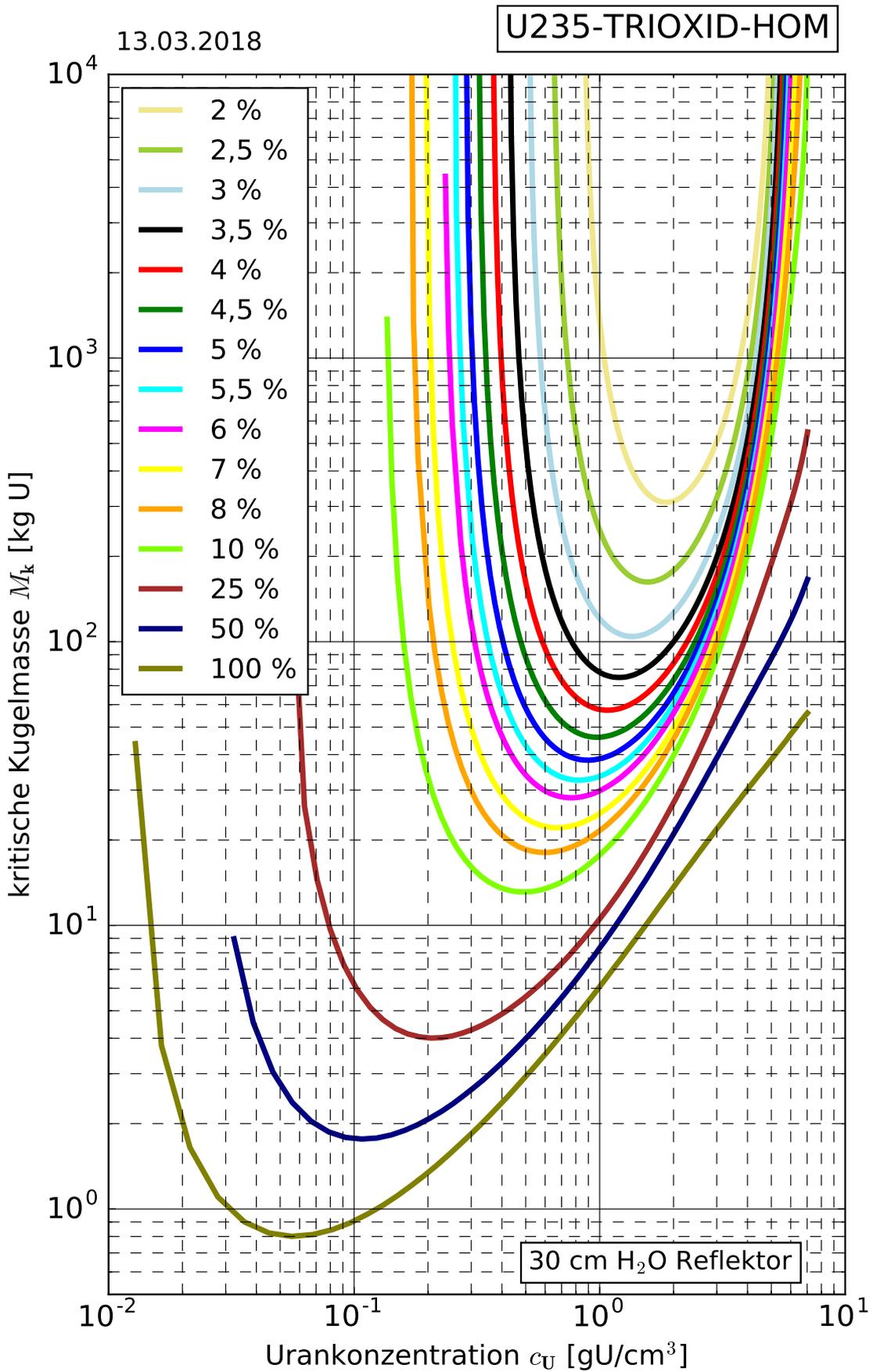


Abb. 1.1.1 Kritische Kugelmasse von homogenen Urantrioxid-Wasser-Systemen

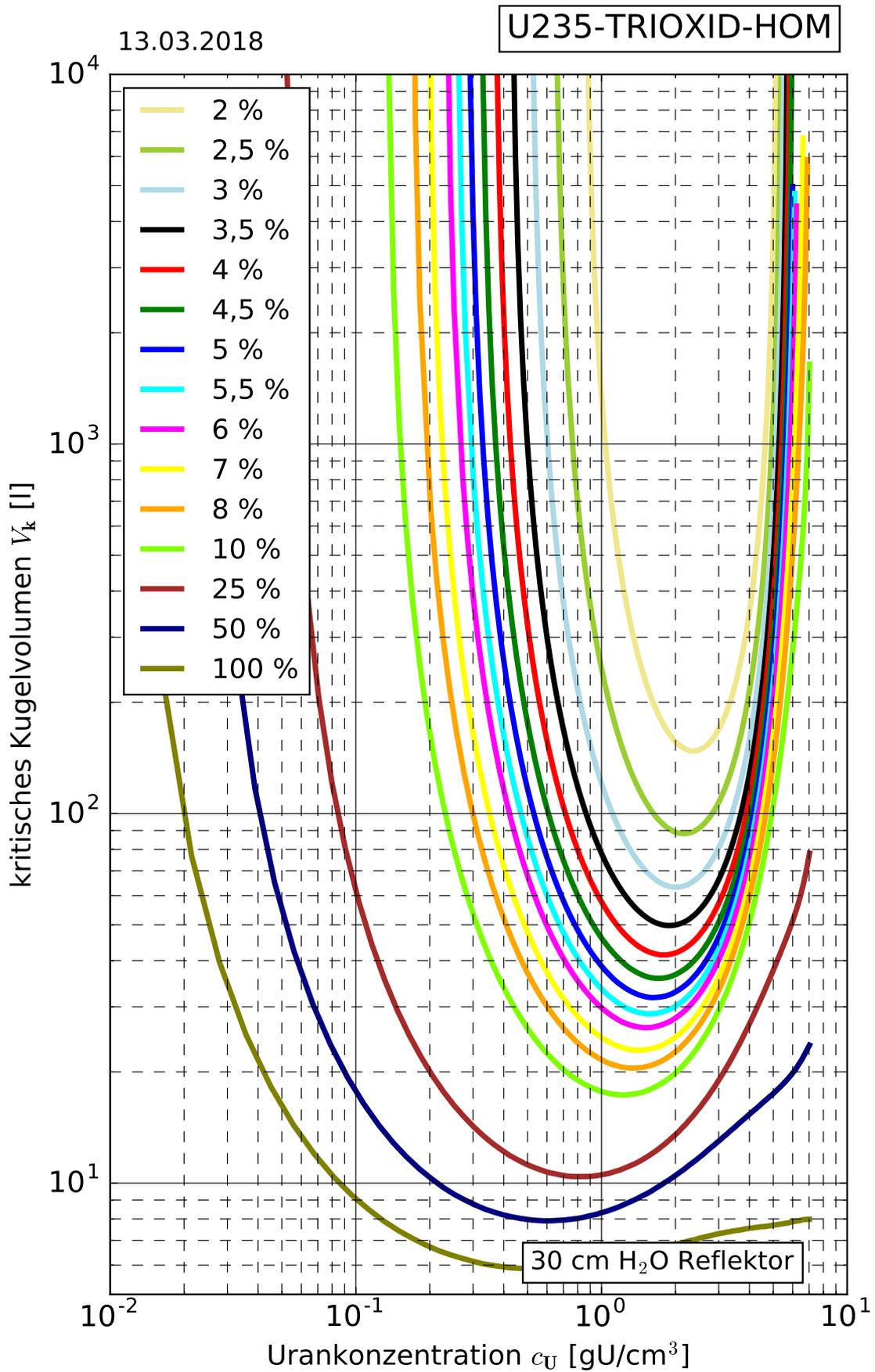


Abb. 1.1.2 Kritisches Kugelvolumen von homogenen Urantrioxid-Wasser-Systemen

13.03.2018

U235-TRIOXID-HOM

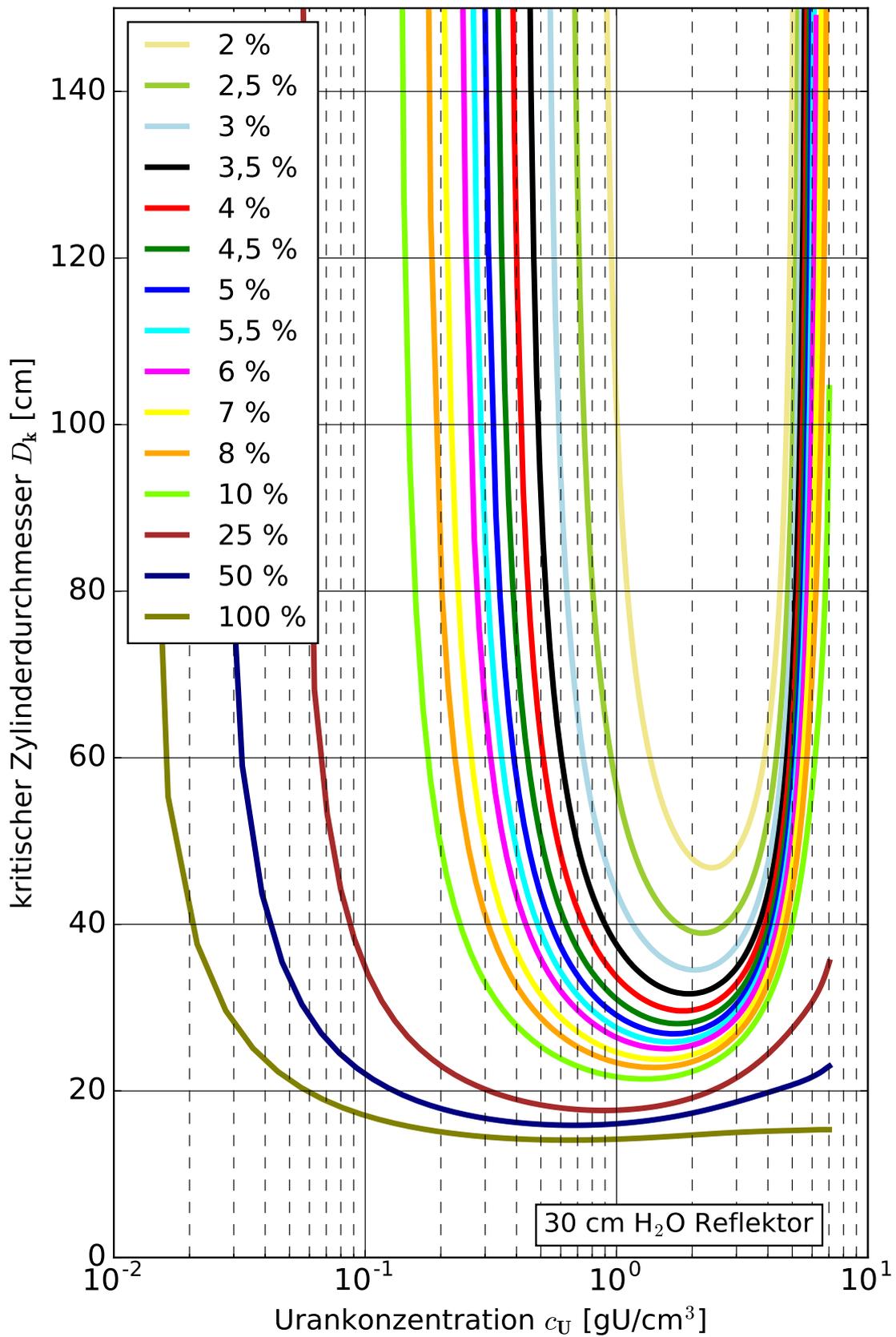


Abb. 1.1.3 Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Urantrioxid-Wasser-Systemen

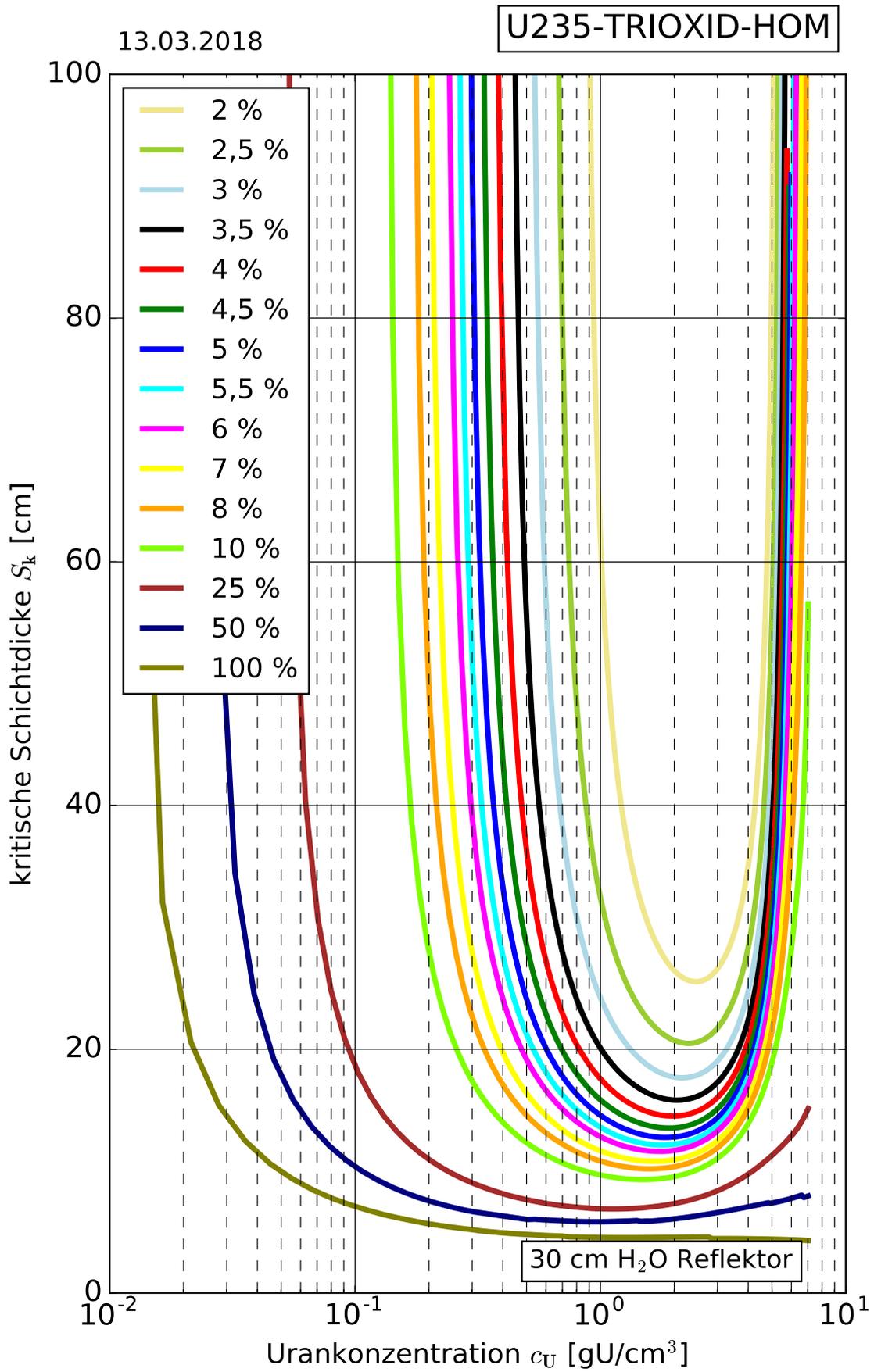


Abb. 1.1.4 Kritische Schichtdicke von homogenen Urantrioxid-Wasser-Systemen

13.03.2018

U235-TRIOXID-HOM

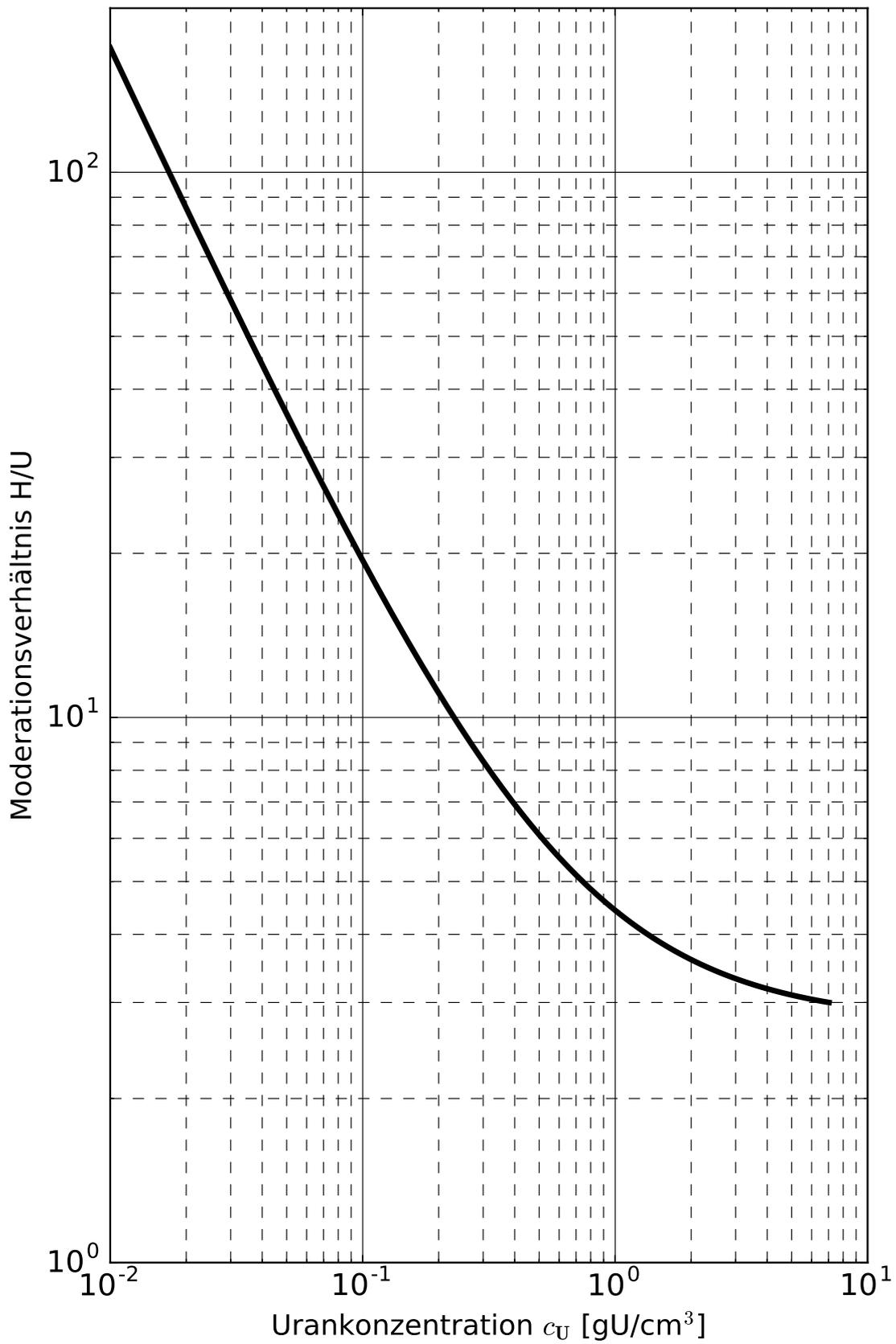


Abb. 1.1.5 Moderationsverhältnis von homogenen Urantrioxid-Wasser-Systemen

13.03.2018

U235-TRIOXID-HOM

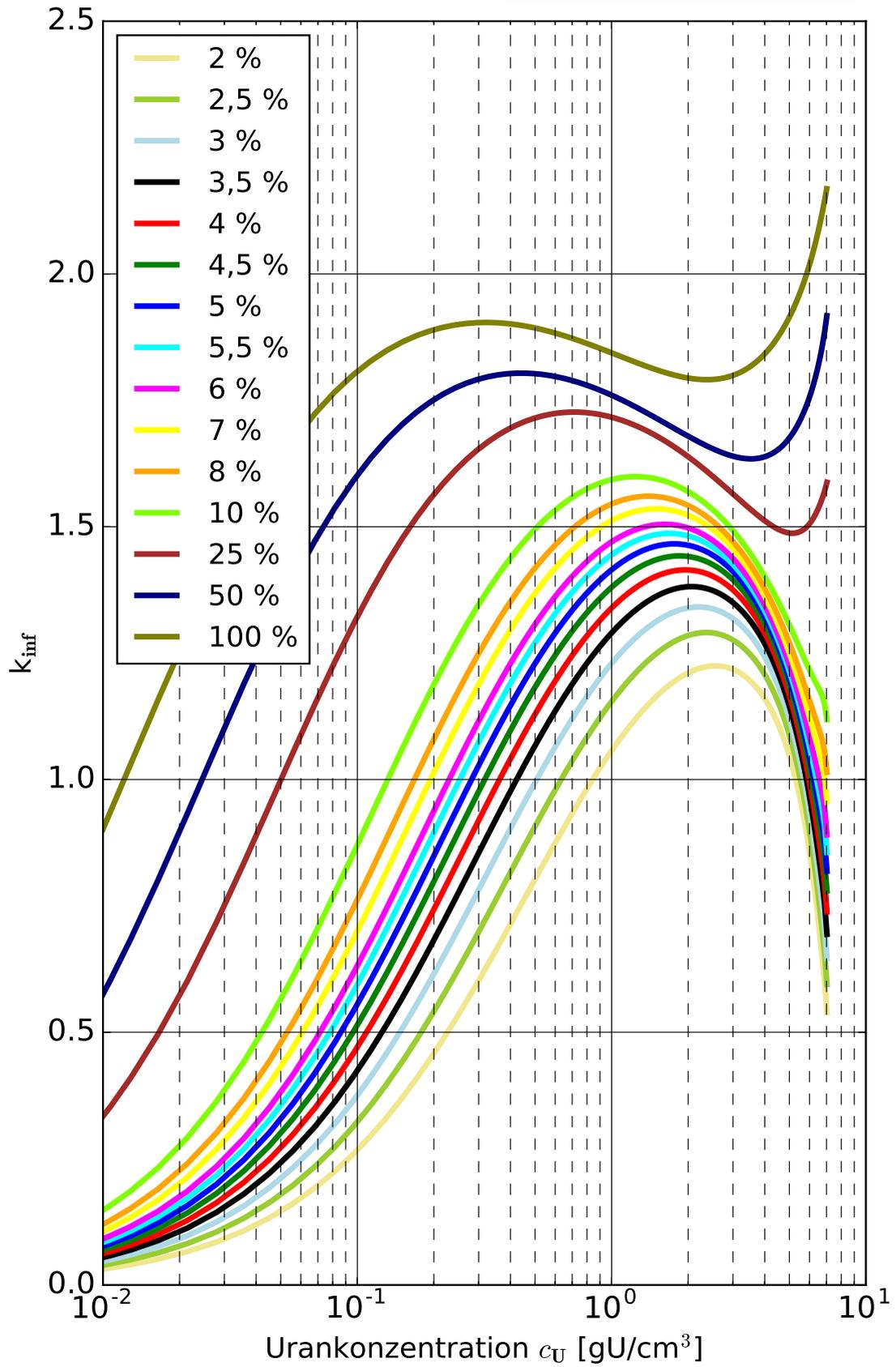


Abb. 1.1.6 Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen Urantrioxid-Wasser-Systemen

13.03.2018

U235-TRIOXID-HOM

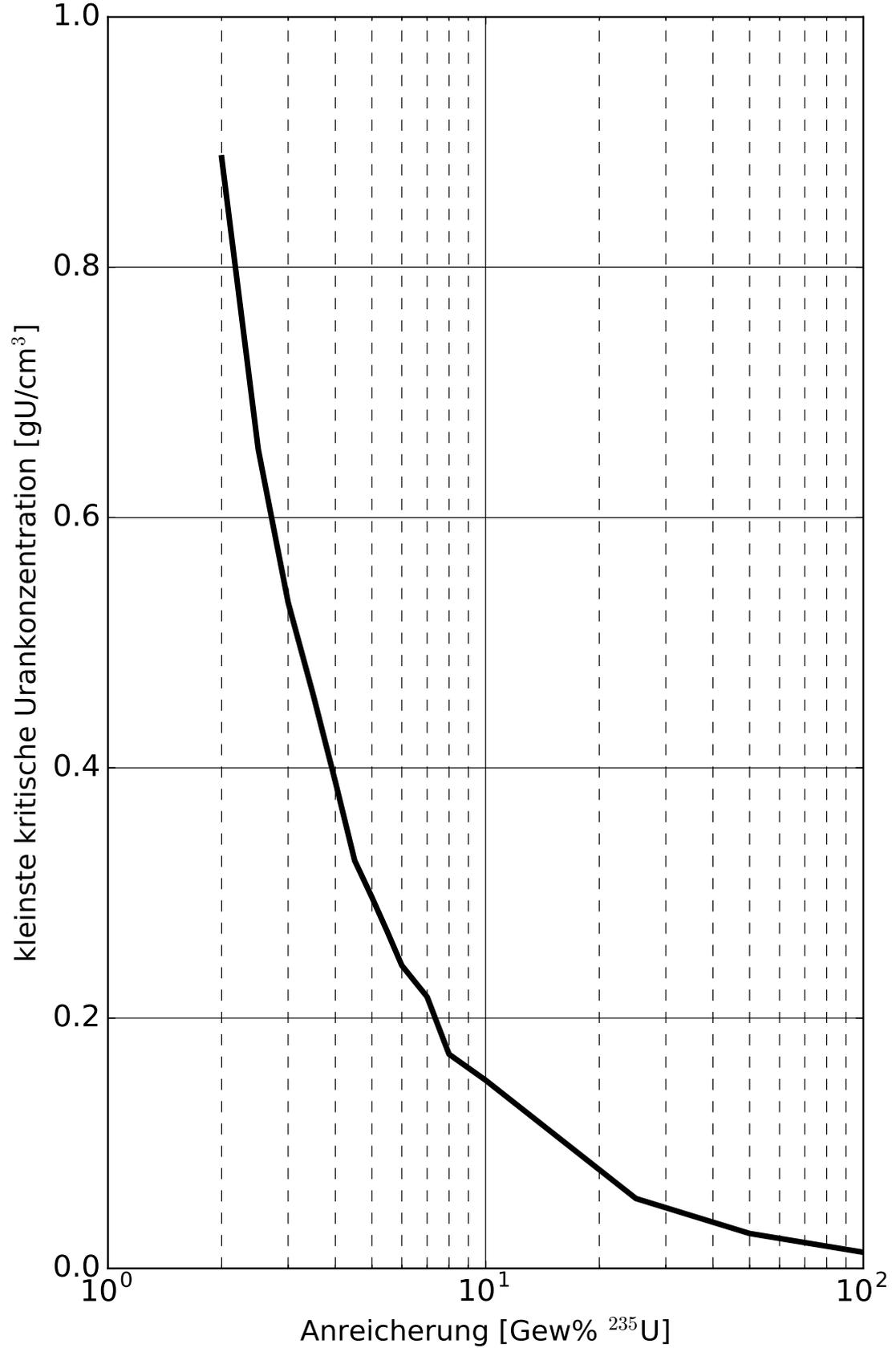


Abb. 1.1.7 Kleinste kritische Konzentration von homogenen Urantrioxid-Wasser-Systemen

13.03.2018

U235-TRIOXID-HOM

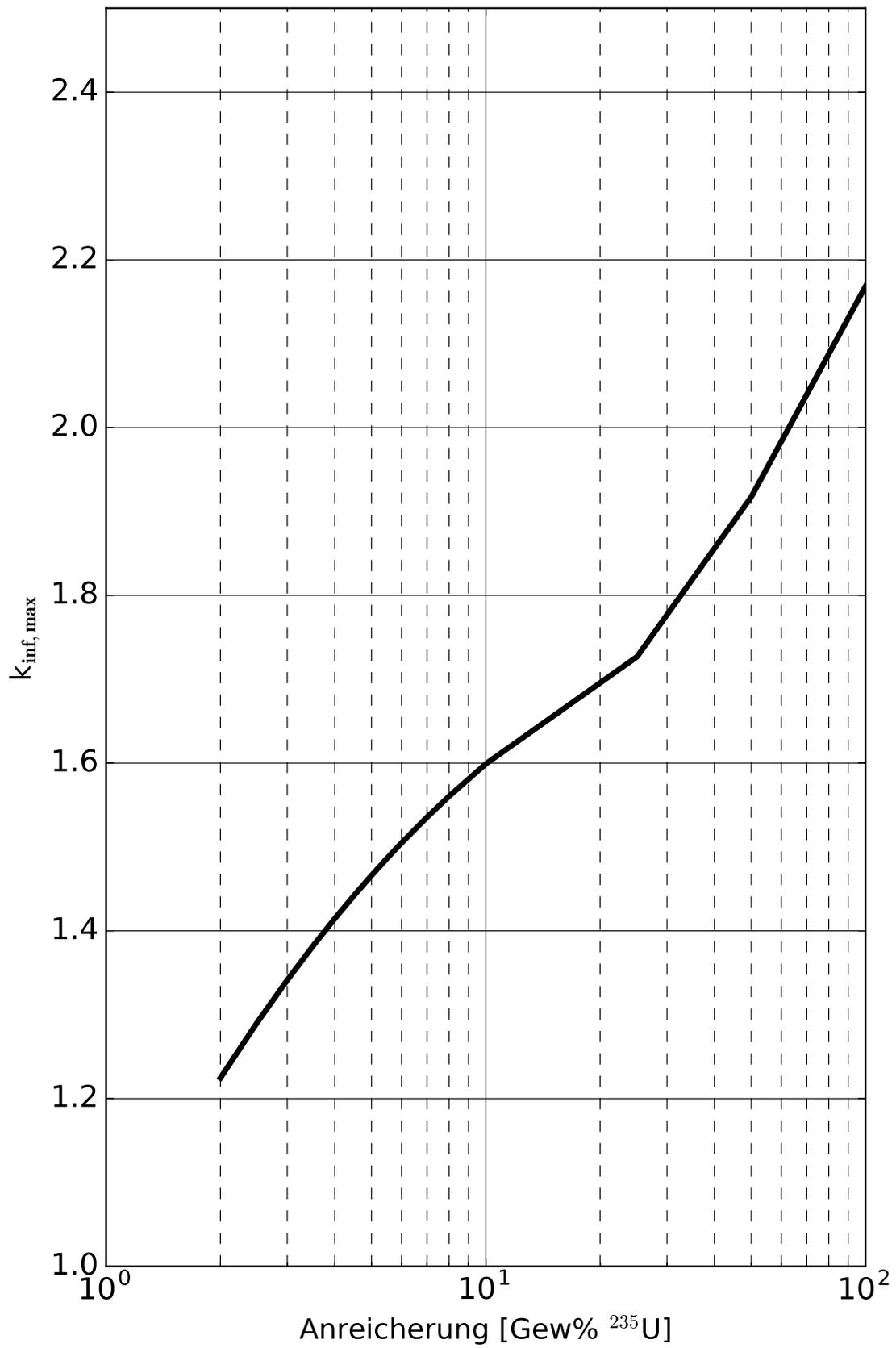


Abb. 1.1.8 Maximaler infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen Urantrioxid-Wasser-Systemen

Diverse Wasser-Systeme

2.B Heterogene Urandioxid-Wasser-Systeme

Die folgenden Tabellen enthalten historische (1973) Kritikalitätsparameter für heterogene Urandioxid-Stabgitter in Leichtwasser im Bereich niedriger ^{235}U -Anreicherung (< 5 Gew%).

Die in Tab. 2.B.A und Tab. 2.B.B zusammengestellten Daten beziehen sich auf Urandioxidstäbe in Leichtwasser ohne Hüllrohrmaterial bei jeweils reaktivstem Stabdurchmesser und Moderator-Spaltstoff-Volumenverhältnis (optimale Moderation hinsichtlich der Spaltstoffmasse oder der geometrischen Abmessungen des Spaltstoffsystems). Es wird ein 30 cm Wasserreflektor und eine UO_2 -Dichte von $10,9 \text{ g/cm}^3$ angenommen. Ein Großteil dieser Werte konnte aus der reichlich vorhandenen Literatur /BRO 61/, /BAI 63/, /BAE 64/, /CLA 65/, /RIC 65/, /STR 65/, /CHA 65/, /CLA 66/, /PRI 66/, /IAE 62/ und /CLA 66/ entnommen werden. Für die ^{235}U -Anreicherungen 3,2, 3,5 und 4,0 Gew% wurden mit den Programmen HAMMER und GAMTEC-THERMOS in 4 bzw. 16 Energiegruppen Vergleichsrechnungen für Systeme ohne Hüllrohre durchgeführt /SUI 67/, /CAR 65/, /HON 61/, deren Ergebnisse sehr gut mit den Daten aus der veröffentlichten Literatur übereinstimmen. Für Kritikalitätsdaten von Urandioxid-Stab-Wasser-Systemen als Funktion des Grades der Moderation wird auf entsprechende Quellen verwiesen /1, 5, 6, 8/.

Tab. 2.B.A Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogenisierte sphärische UO₂-Stab-Wasser-Systeme bei reaktivstem Stabdurchmesser und reaktivstem Moderationsverhältnis

Anreicherung [Gew% ²³⁵ U]	Masse [kg U]		Volumen [Liter]	
	kritisch	sicher ¹	kritisch	sicher ¹
0,95	4420	1980	1070	686
1,0	3000	1350	700	490
1,1	1550	697	390	292
1,3	690	310	205	165
1,5	430	195	138	110
2,0	190	85	70,5	56,5
2,5	118	53,1	47,5	38,0
3,0	81,5	36,7	38,0	30,5
3,2	72,0	32,4	35,2	28,2
3,5	60,5	27,2	31,2	25,0
4,0	47,0	21,1	27,5	22,0
5,0	31,2	14,0	22,0	17,7

¹ Sicherheitsfaktoren:

Sichere Masse ≤ 45 % der kritischen Masse **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

Sicheres Volumen ≤ 80 % des kritischen Volumens **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

Tab. 2.B.B Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogenisierte UO₂-Stab-Wasser-Systeme in Zylinder- und Schichtgeometrie bei reaktivstem Stabdurchmesser und reaktivstem Moderationsverhältnis

Anreicherung [Gew% ²³⁵ U]	Durchmesser eines infiniten Zylinders [cm]		Dicke einer infiniten Schicht [cm]	
	kritisch	sicher ¹	kritisch	sicher ¹
0,95	94,0	80,5	56,8	48,0
1,0	85,0	72,2	48,2	41,0
1,1	71,0	63,0	39,5	34,0
1,3	55,0	48,8	30,2	27,3
1,5	47,0	42,0	25,4	23,0
2,0	36,5	32,6	28,9	17,0
2,5	32,0	28,8	15,6	14,0
3,0	29,2	26,0	13,9	12,5
3,2	28,4	25,5	13,4	12,0
3,5	27,2	24,5	12,7	11,4
4,0	25,8	23,2	11,8	10,6
5,0	23,6	21,0	10,6	9,5

¹ Sicherheitsfaktoren:

Sichere Dimension $\leq 90\%$ der kritischen Dimension **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

Die Zuverlässigkeit der HAMMER-Berechnungsmethode wurde durch Nachrechnen von Experimenten geprüft (Tab. 2.B.C). Außerdem wird auf die Veröffentlichungen /CHI 68/ und /KUP 70/ verwiesen.

Tab. 2.B.C Vergleich von experimentellen Daten mit HAMMER-Berechnungen für niedrig angereicherte Urandioxidstab-Wasser-Systeme (aus /CLA 66/, Tab. II)

Moderator-Spaltstoff Volumenverhältnis	Kritischer Zylinderdurchmesser [cm]	
	Experiment	HAMMER
3 Gew% angereicherte Urandioxidstäbe mit Stahlhüllrohr in Wasser		
2,61	53,40	54,53
3,56	47,60	47,87
8,10	48,40	48,28
4,02 Gew% angereicherte Urandioxidstäbe mit Stahlhüllrohr in Wasser		
2,18	40,36	41,29
2,59	37,50	37,83
2,61	43,40	43,66
3,57	38,60	38,80
8,10	37,20	37,30
10,0	39,60	39,58

Hinweis: Die Tabellenwerte dieses Kapitels stammen aus dem Jahr 1973 und wurden unverändert übernommen. Aufgrund des veralteten Verfahrens ihrer Herleitung (iterative Annäherung des vorzugebenden materiellen Bucklings bei der Mittelung der Wirkungsquerschnitte) wurden die Datenblätter zu kritischen Massen, Volumina, Zylinder- und Schichtdicken heterogener Systeme aus dieser Ausgabe des Handbuchs entfernt.

3.B Homogene Urandioxid-Thoriumdioxid-Wasser- und -Isopropanol-Systeme

Homogene Urandioxid-Thoriumdioxid-Wasser-Systeme

Die folgenden Kurvenblätter enthalten historische Kritikalitätsparameter für homogene Urandioxid-Thoriumdioxid-Wasser-Systeme bei verschiedenen Gewichtsanteilen Urandioxid im Gesamtoxid. Der Gewichtsanteil Urandioxid im Gesamtoxid ist als Kurvenparameter ersichtlich. Zur Charakterisierung des Uran-Thorium-Verhältnisses wird auch häufig das Thorium/Uran-Gewichtsverhältnis (N-Wert) benützt. 20 Gew% Urandioxid im Gesamtoxid entsprechen beispielsweise einem N-Wert von 4 (80 Gew% Thorium / 20 Gew% Uran = 4).

Das im Urandioxid vorhandene Uran stellt bei den berechneten Werten stets reines ^{235}U dar, Thorium ist stets ^{232}Th . Als maximale Dichte von Urandioxid-Thoriumdioxid wurde in den Rechnungen $10,0\text{ g/cm}^3$ veranschlagt.

Sämtliche berechneten Daten gelten für voll wasserreflektierte Systeme (30 cm Wasserreflektor). Die Berechnung erfolgte mit den CODES GAMTEC /CAR 65/ und DTF /LAT 65/ in 16 Energiegruppen. Bei den DTF-Rechnungen wurde meist eine S_8 -, bei Zylindern eine S_4 -Approximation benutzt. Anisotrope Streuung wurde in P_1 -Näherung berücksichtigt. Im untermoderierten Bereich wurden auch 16 Gruppen-Hansen-Roach-Wirkungsquerschnitte verwendet /HAN 61/.

Die Resultate sind vergleichbar zu den unter Kapitel 1.B dargestellten Urandioxid-Wasser-Daten bei entsprechender Anreicherung. Nach frühen Berechnungen (1974) und nach Berechnungen aus /JON 66/ ist die Annahme von ^{238}U als Resonanzabsorber an Stelle von ^{232}Th meist konservativ, weshalb anstelle von Uran-/Thorium-Mischdioxid auch Urandioxid-Kritikalitätsdaten (mit ^{238}U als substituierenden Resonanzabsorber) verwendet werden können. Literatur zu Urandioxid-Thoriumdioxid-Wasser-Systemen findet sich in /JON 66/, /WEH 61/.

Hinweis: Ergänzend finden sich zu Vergleichszwecken in Bezug auf ^{233}U -Systeme einige weitere, z. T. jüngere Kritikalitätsdaten zu ^{235}U -Urandioxid-Thoriumdioxid-Wasser-Systemen in Kapitel 15.B von Band 2, Teil 2.

Homogene Urandioxid-Thoriumdioxid-Isopropanol-Systeme

Außerdem enthält dieses Kapitel Kurvenblätter mit Kritikalitätsdaten für homogene Urandioxid-Thoriumdioxid-Isopropanol-Systeme. In der Fertigung von Brennstoffpartikeln für die Urandioxid-Thoriumdioxid-Graphit-Kugelbrennelemente treten u. a. solche Spaltstoffgemische mit Isopropanol (Summenformel C_3H_8O) als Moderator auf.

Die Kritikalitätsdaten ab Abb. 3.B.13 beziehen sich auf homogene Urandioxid-Thoriumdioxid-Isopropanol-Systeme. Der H-Anteil liegt in Isopropanol mit ca. 13,4% etwas höher als der H-Anteil in Wasser. Die Dichte des Isopropanols beträgt $0,7855\text{g/cm}^3$. Die theoretische Dichte des Urandioxid-Thoriumdioxid wurde hier zu $10,9\text{g/cm}^3$ unterstellt. Die Berechnung der Kritikalitätsdaten erfolgt wie oben dargestellt.

Der Vergleich mit den wassermodierten Systemen oben zeigt, dass die Isopropanolssysteme im Minimum der Kurven etwas größere kritische Werte als die wassermodierten Systeme aufweisen, was in der niedrigeren Dichte des Isopropanol von etwa $0,78\text{g/cm}^3$ gegenüber Wasser begründet liegt.

07.06.1974

U235/Th-OXID-HOM

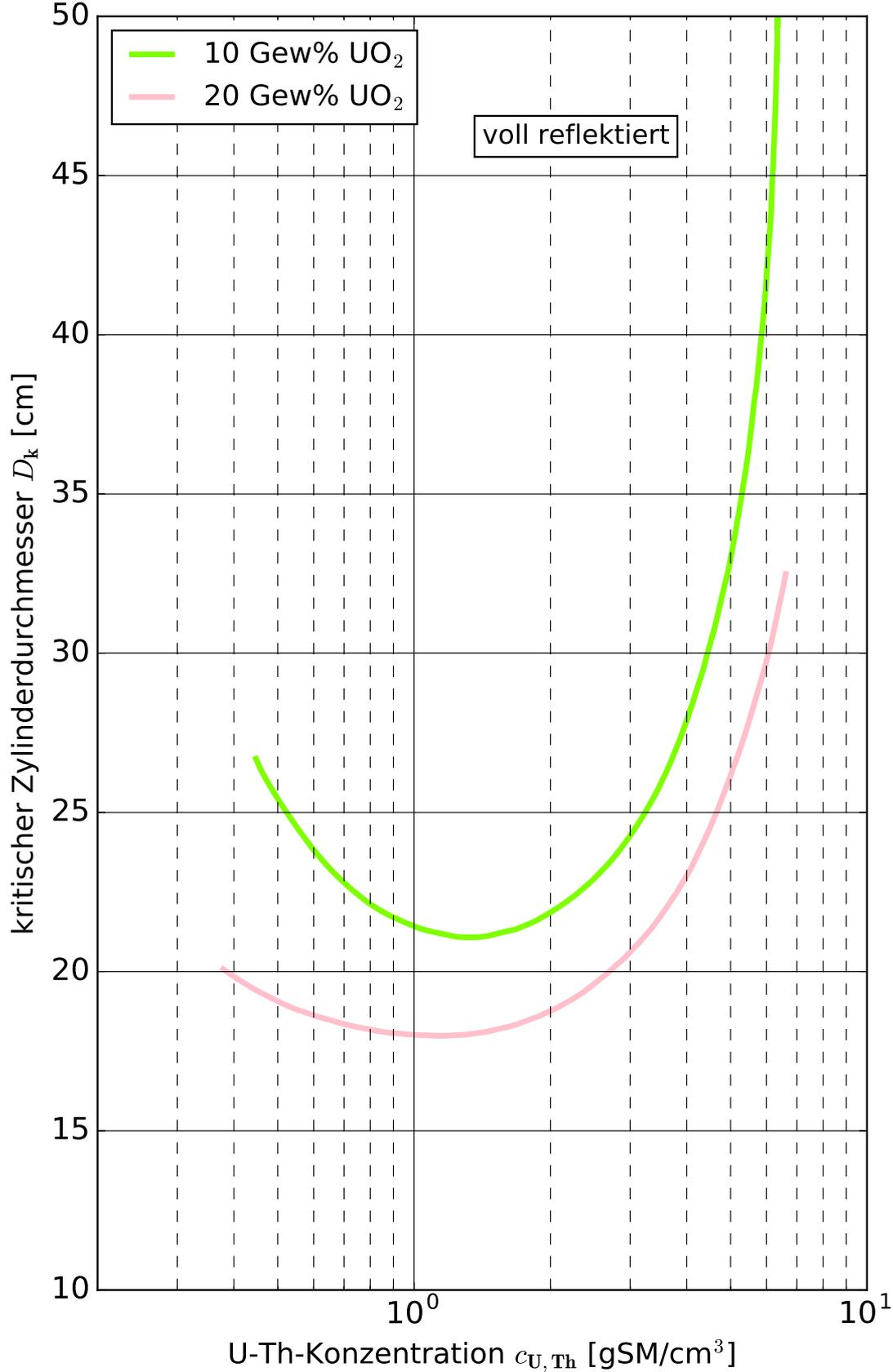


Abb. 3.B.3 Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Urandioxid-Thoriumdioxid-Wasser-Systemen

07.06.1974

U235/Th-OXID-HOM

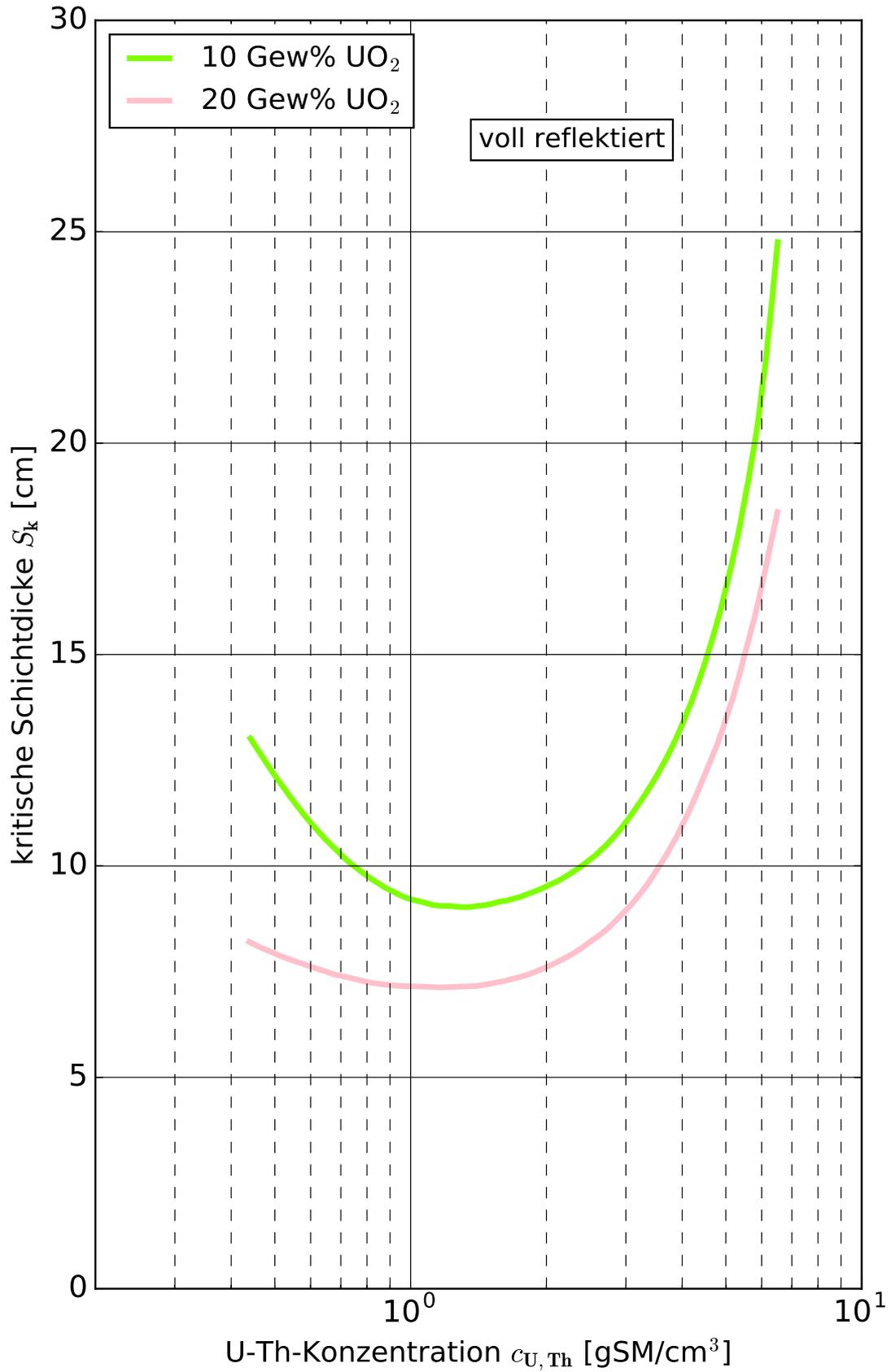


Abb. 3.B.4 Kritische Schichtdicke von homogenen Urndioxid-Thoriumdioxid-Wasser-Systemen

07.06.1974

U235/Th-OXID-HOM-ISOP

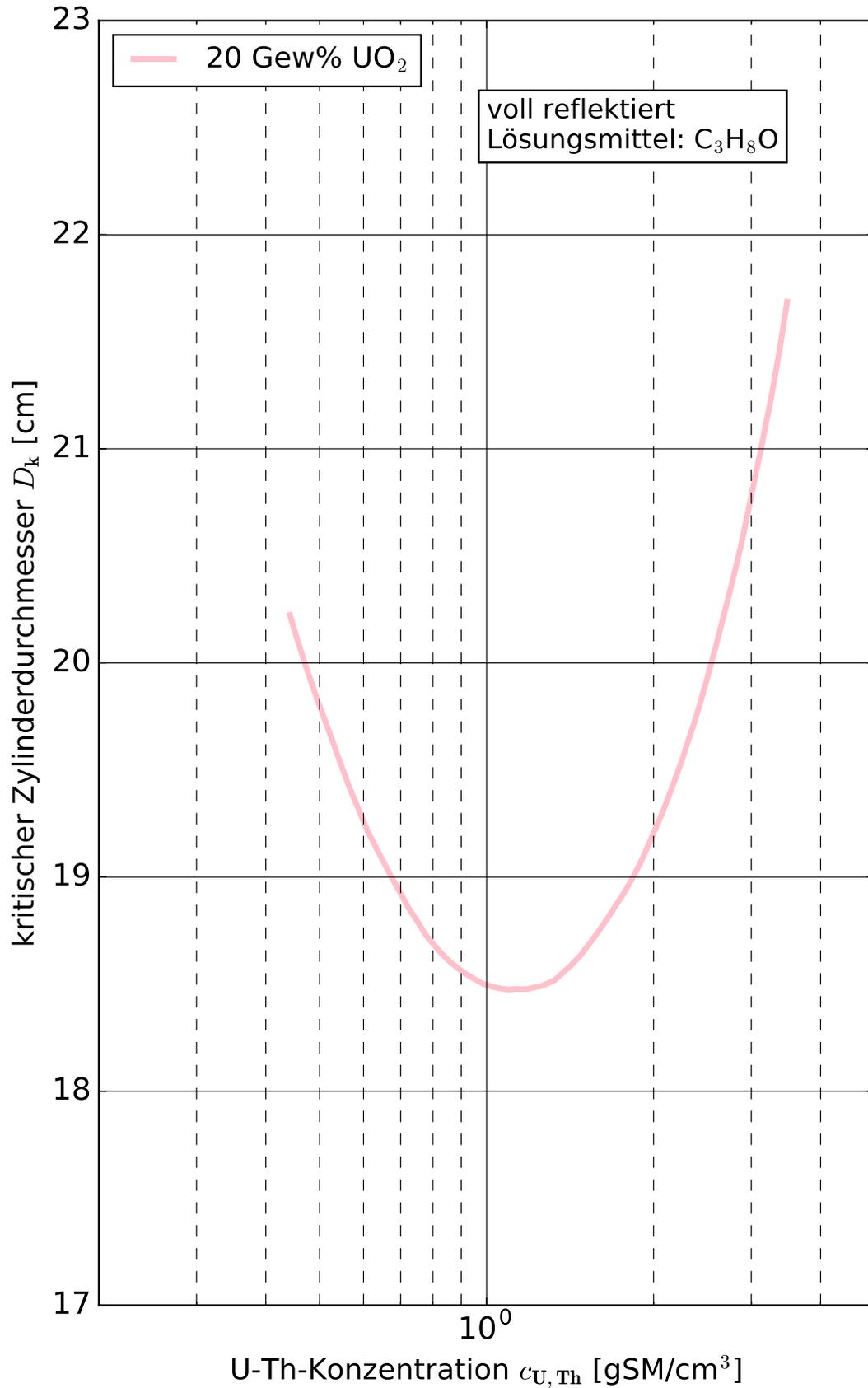


Abb. 3.B.13 Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Urandioxid-Thoriumdioxid-Isopropanol-Systemen

07.06.1974

U235/Th-OXID-HOM-ISOP

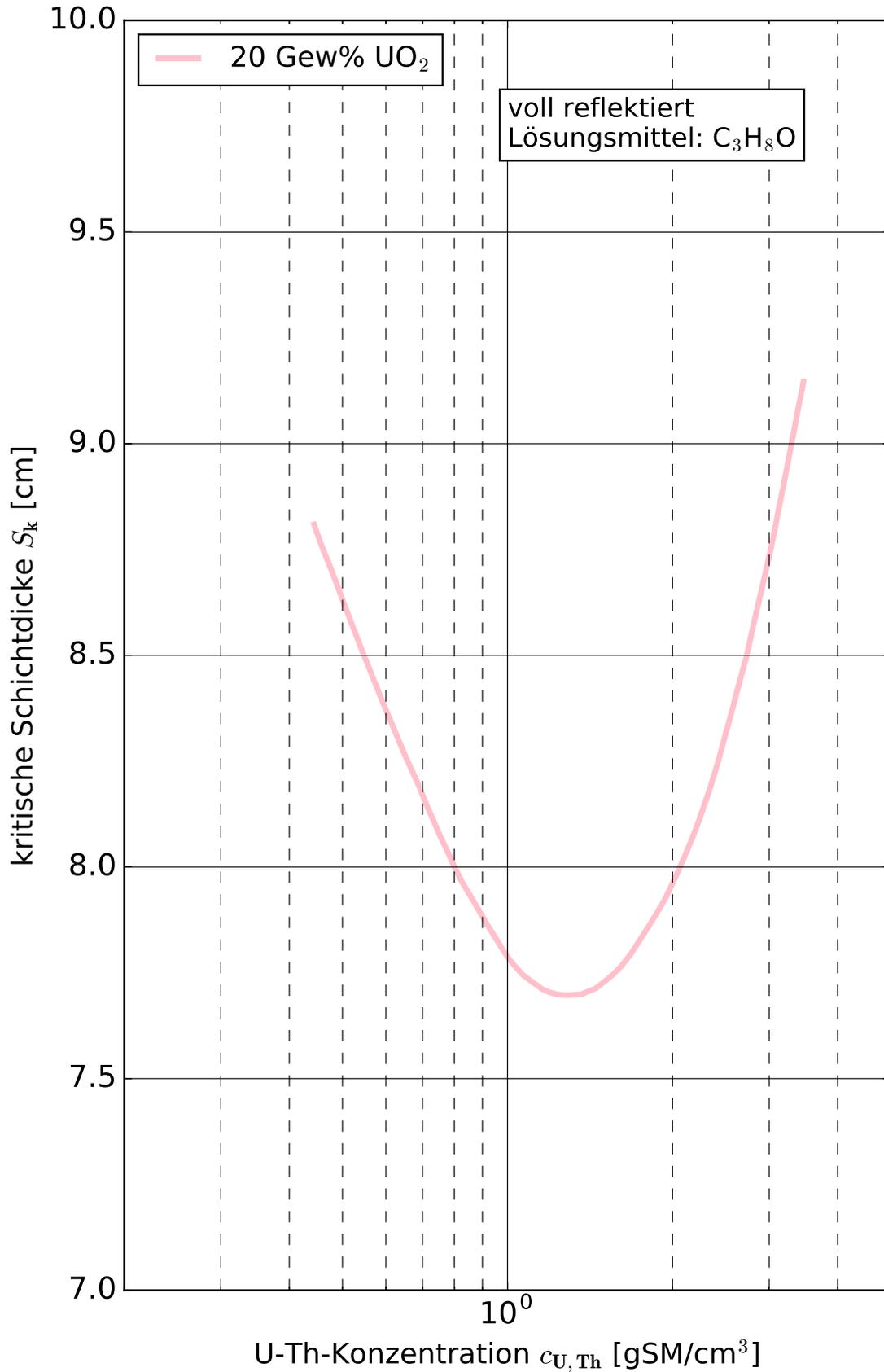


Abb. 3.B.14 Kritische Schichtdicke von homogenen Urandioxid-Thoriumdioxid-Isopropanol-Systemen

Homogene Graphit-Systeme

5.A Homogene $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ -Graphit-Systeme

Die folgenden Kurvenblätter enthalten historische Kritikalitätsparameter für homogene Uran-Graphit-Systeme im Bereich guter Graphitmoderation. Die ^{235}U -Anreicherung beträgt 93 Gew% (kurze Schreibweise: U(93)). Es wurden auch Daten für 20 Gew% U(93) und 80 Gew% ^{238}U bestimmt. Die Rechnungen wurden mit dem Multigruppencode GAMTEC /CAR 65/ und in Diffusionsrechnung mit dem Code FOG /FLA 61/ durchgeführt. Die Resultate ähnlicher Berechnungen von Marchuk /MAR 60/, Stratton /STR 63/ und aus den UKAEA-Handbook (Abb. 1.C.1 /UKA 65/) wurden verwertet. Experimentelle Daten finden sich bei Reynolds /REY 58/ und in ANL-5800 /ANL 63/.

Bei Graphitmoderation sind die Resultate stark von der Graphitdichte in Spaltzone und Reflektor abhängig. Je höher die Graphitdichte, desto geringer ist im allgemeinen die kleinste kritische Kugelmasse bei gleichem C/ ^{235}U Moderationsverhältnis. In den präsentierten Berechnungen beträgt die Graphitdichte in der Spaltzone $1,9\text{ g/cm}^3$, im Reflektor $1,65\text{ g/cm}^3$. Als Reflektor sind 30 cm Wasser oder 100 cm Graphit berücksichtigt.

Eine Schwierigkeit bei der Berechnung graphitmoderierter Systeme stellt die gegenüber wassermoderierten Spaltstoffsystemen viel stärkere Abhängigkeit der Wirkungsquerschnitte vom vorgegebenen Buckling bei der Berechnung der Gruppenkonstanten dar. Diese Abhängigkeit der Wirkungsquerschnitte vom Buckling und damit von den geometrischen Abmessungen ist eine Folge des gegenüber Wasser viel größeren Fermialters τ von Graphit und der weit größeren thermischen Diffusionslänge L. Bei der Berechnung zutreffender Wirkungsquerschnittsätze muss daher häufig iterativ vorgegangen werden (Berechnung von Gruppenkonstanten mit Bucklingschätzwert, dann Neuberechnung mit aus dem ersten Lauf resultierendem Buckling).

Die gegen Wasser stark vergrößerten Werte für das Fermialter τ und die Diffusionslänge L bewirken auch, dass die einfache Abschätzung nach Gleichung (1-5) aus Band 1 nur sehr ungenaue k_{eff} -Werte liefert, da eine Zusammenfassung von τ und L^2 zu einer Wanderfläche M^2 hier keine gute Näherung mehr darstellt. k_{eff} muss vielmehr nach Gleichung (1-9) aus Band 1:

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_{\infty} e^{-B_g^2 \tau}}{1 + L^2 B_g^2} \quad (5.3)$$

oder vereinfacht nach

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_{\infty}}{(1 + \tau \cdot B_g^2)(1 + L^2 B_g^2)} \quad (5.4)$$

berechnet werden. k_{∞} bezeichnet den infiniten Multiplikationsfaktor, B_g^2 die geometrische Flusswölbung.

Da bei der Berechnung der graphitmoderierten Systeme aus den oben angeführten Gründen größere Ungenauigkeiten auftreten können, außerdem weniger Vergleichsmaterial aus Experimenten oder Berechnungen vorliegt, sind bei der Verwendung der nachstehenden Kurven größere Sicherheitsabschläge anzubringen.

Während bei Wassermoderation Kritikalitätsdaten für ^{238}U enthaltende Systeme mit guter Genauigkeit auch auf ^{232}Th enthaltende Systeme gleicher Spaltstoff- und Moderationszusammensetzung übertragen werden können, ist bei Graphitmoderation diese Näherung nicht mehr zulässig. Es wird daher für beide auf die unter Kapitel 7.B angegebenen Kritikalitätsdaten verwiesen.

02.08.1971

U235-C-HOM

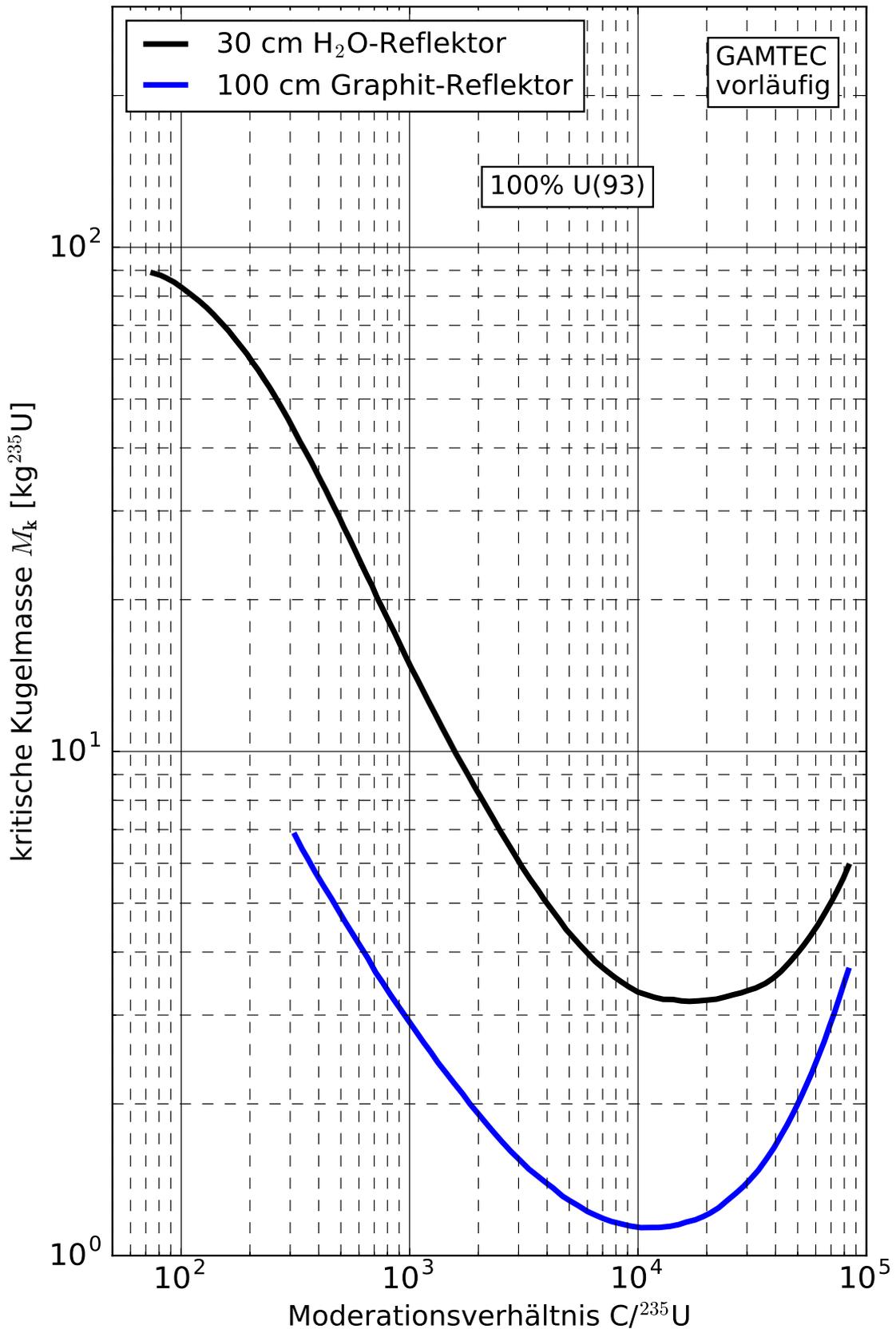


Abb. 5.A.1 Kritische Kugelmasse von homogenen U(93)-Metall-Graphit-Systemen

02.08.1971

U235-C-HOM

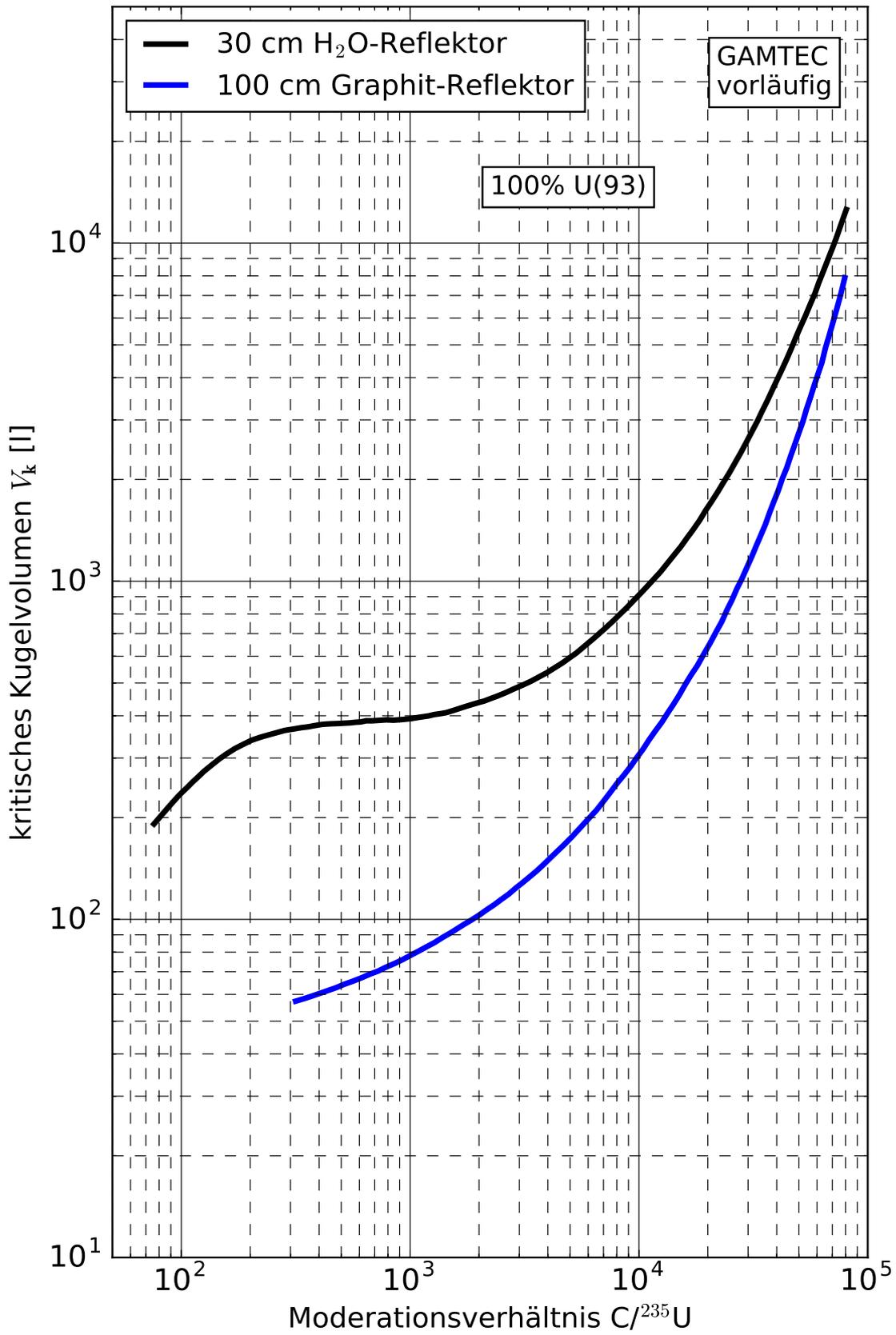


Abb. 5.A.2 Kritisches Kugelvolumen von homogenen U(93)-Metall-Graphit-Systemen

02.08.1971

U235-C-HOM

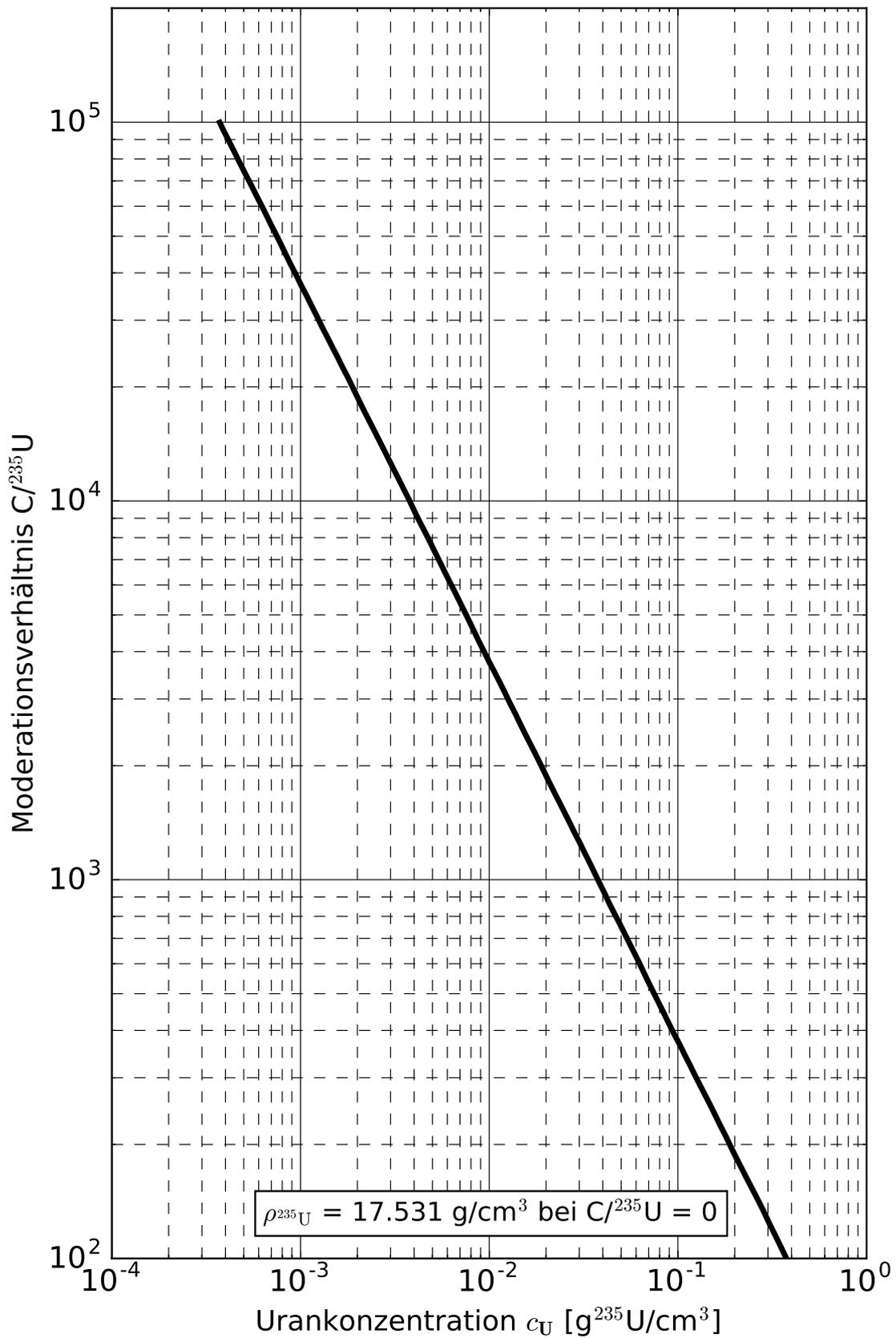


Abb. 5.A.5 Moderationsverhältnis $C/^{235}\text{U}$ von homogenen U(93)-Metall-Graphit-Systemen

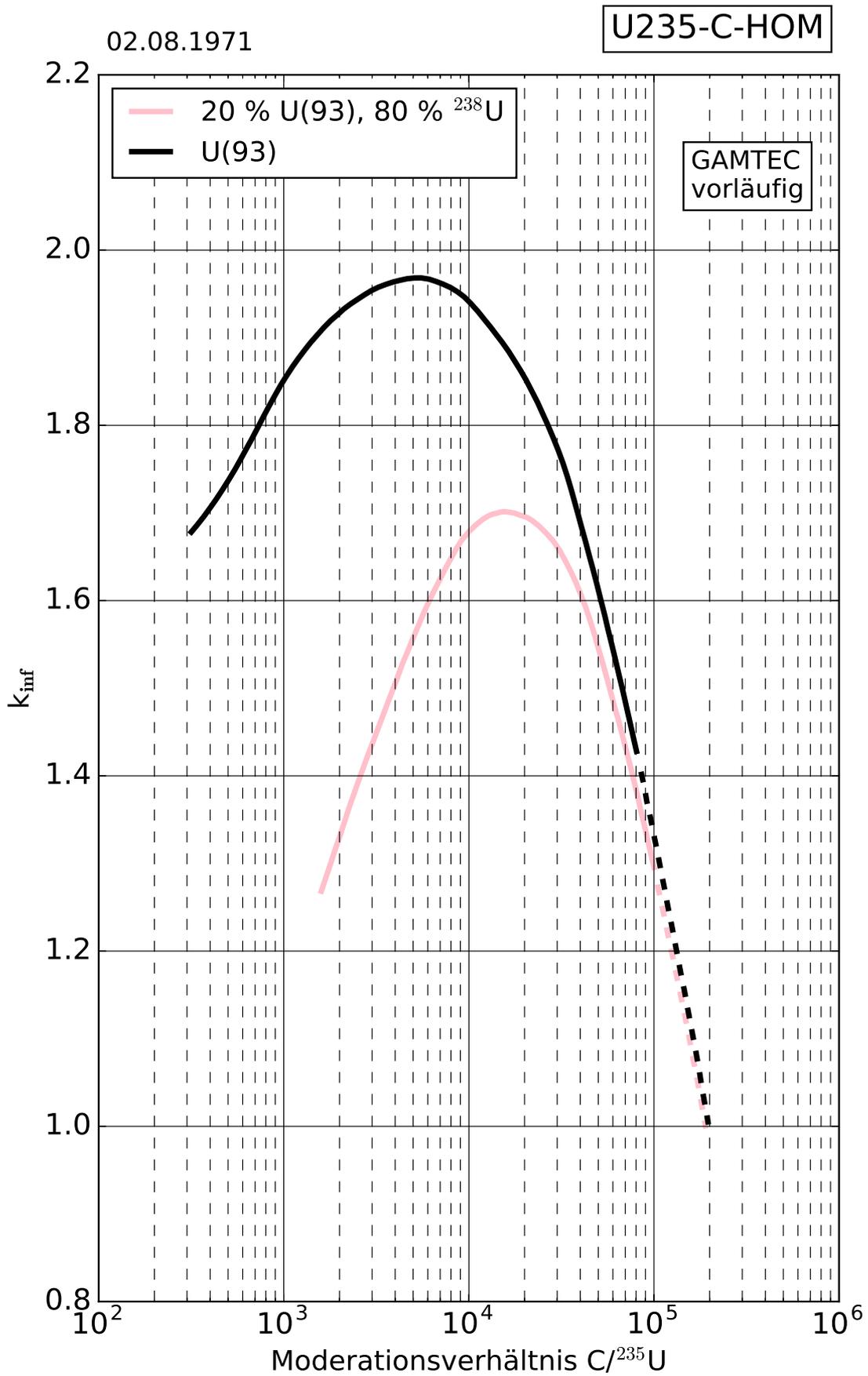


Abb. 5.A.6 Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen U(93)-Metall-Graphit-Systemen

02.08.1971

U235-C-HOM

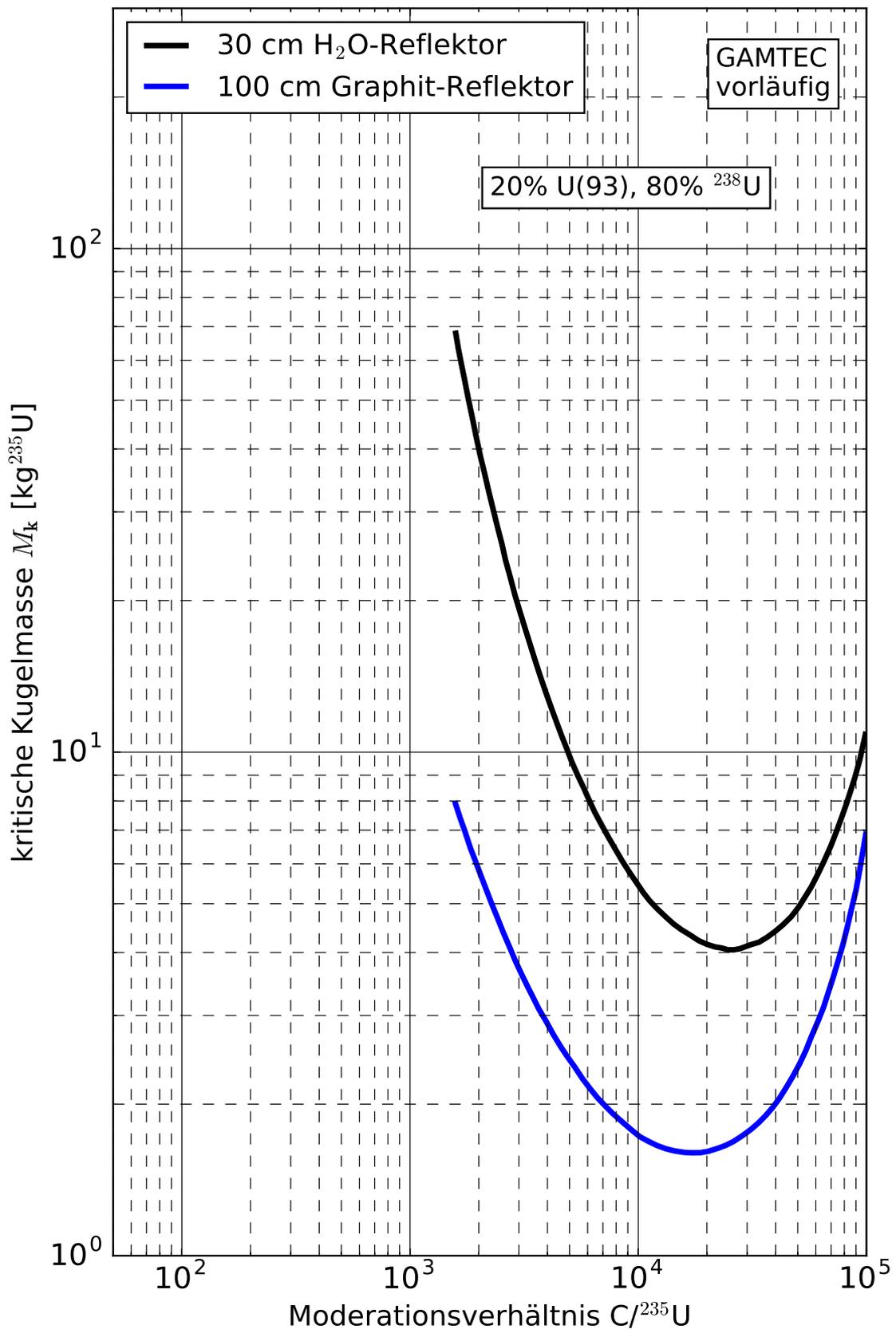


Abb. 5.A.11 Kritische Kugelmasse von homogenen Uranmetall-Graphit-Systemen

02.08.1971

U235-C-HOM

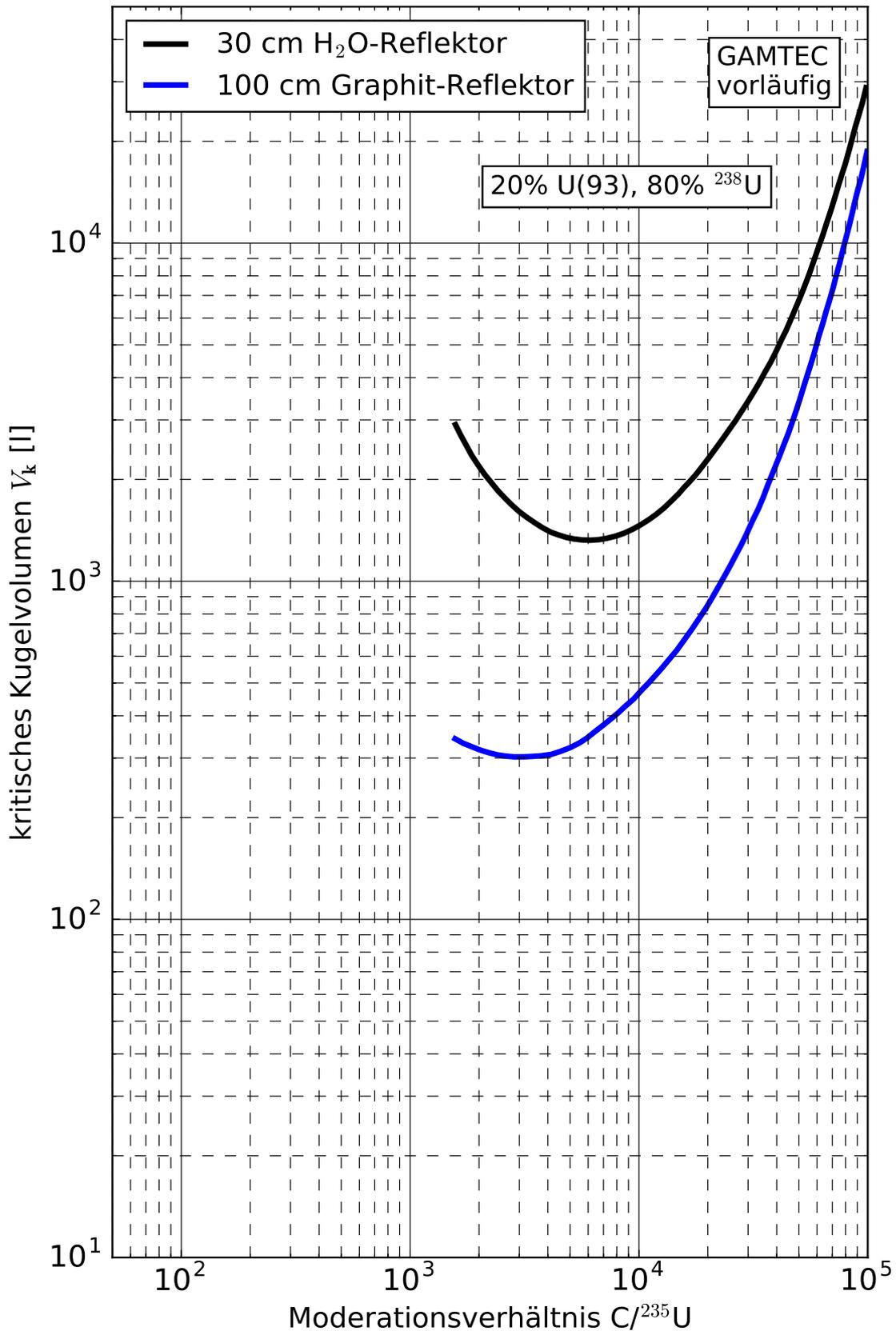


Abb. 5.A.12 Kritisches Kugelvolumen von homogenen Uranmetall-Graphit-Systemen

5.B Homogene Urandioxid-Graphit-Systeme

Die folgenden Kurvenblätter enthalten Kritikalitätsparameter für homogene Urandioxid-Graphit-Systeme. Die Daten wurden mit dem Rechenverfahren XSDRN über die Steuersequenz CSAS1 aus dem Codepaket SCALE 6 /ORN 11/ berechnet /KIL 13/. Dabei wurde die Wirkungsquerschnittsbibliothek v7-238 verwendet, die auf ENDF/B-VII.0 Daten basiert. Die Resonanzbehandlung erfolgte mit den Modulen BONAMI und CENTRM. Es wurden zum einen Rechnungen mit 100 cm Graphitreflektor ($\rho_C = 1,65 \text{ g/cm}^3$) mit einer Graphitdichte in der Spaltzone von $\rho_C = 1,9 \text{ g/cm}^3$ durchgeführt: Abb. 5.B.1 und Abb. 5.B.2. Zum anderen wurden Rechnungen mit 30 cm H₂O-Reflektor mit einer Graphitdichte in der Spaltzone von $\rho_C = 2,3 \text{ g/cm}^3$ durchgeführt: Abb. 5.B.11 und Abb. 5.B.12.

Mit dem Monte Carlo Code MCNP 5 Version 1.51 und ENDF/B-VII.0 Punktwirkungsquerschnittsdaten wurden stichprobenweise Vergleichsrechnungen durchgeführt, um die berechneten Daten zu verifizieren. Da bislang keine Validierung an kritischen Benchmark-Experimenten durchgeführt wurde, wird die Verwendung entsprechender Sicherheitsfaktoren empfohlen.

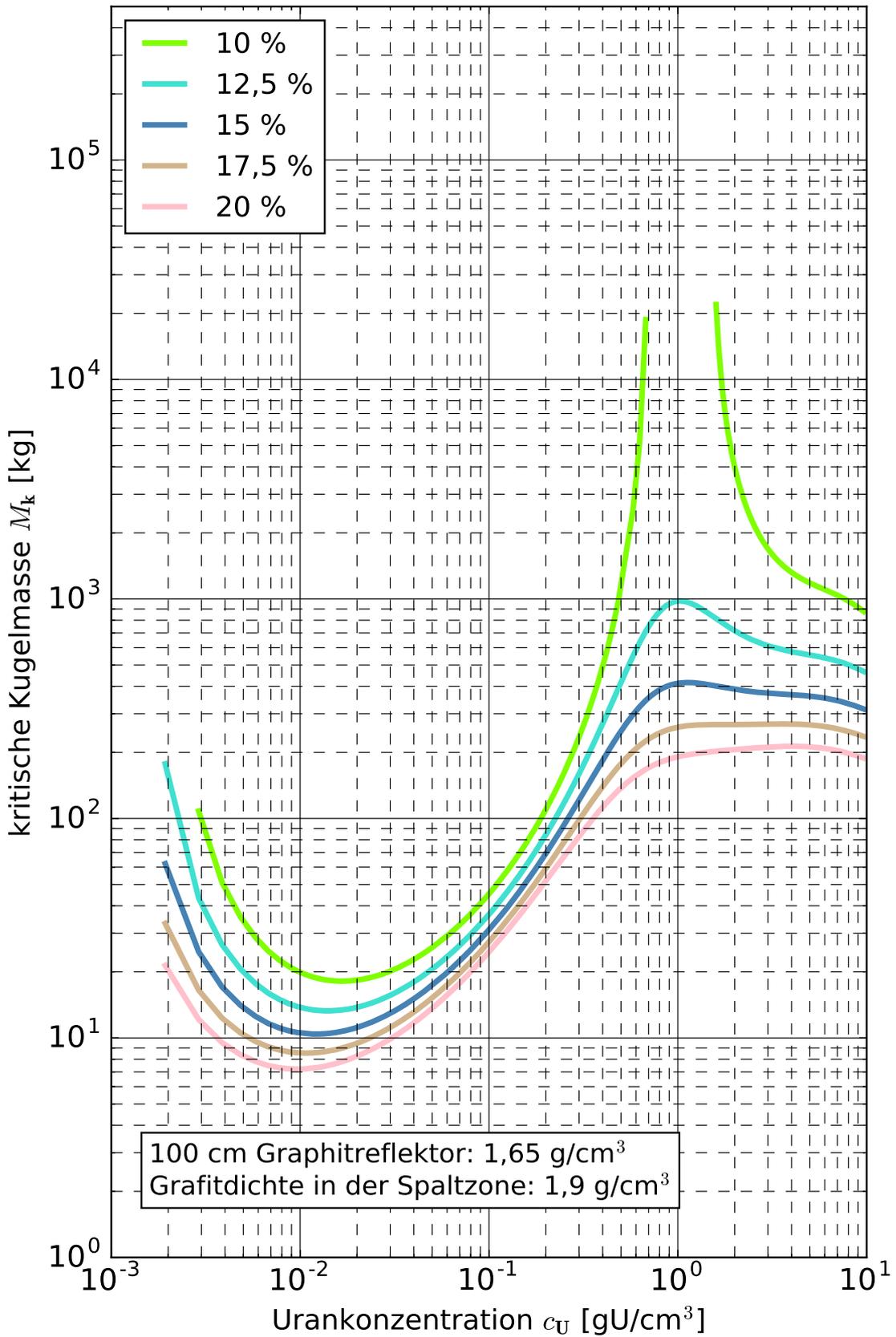


Abb. 5.B.1 Kritische Kugelmasse von homogenen Urandioxid-Graphit-Systemen mit Graphitreflektor

28.03.2011

U235-C-HOM

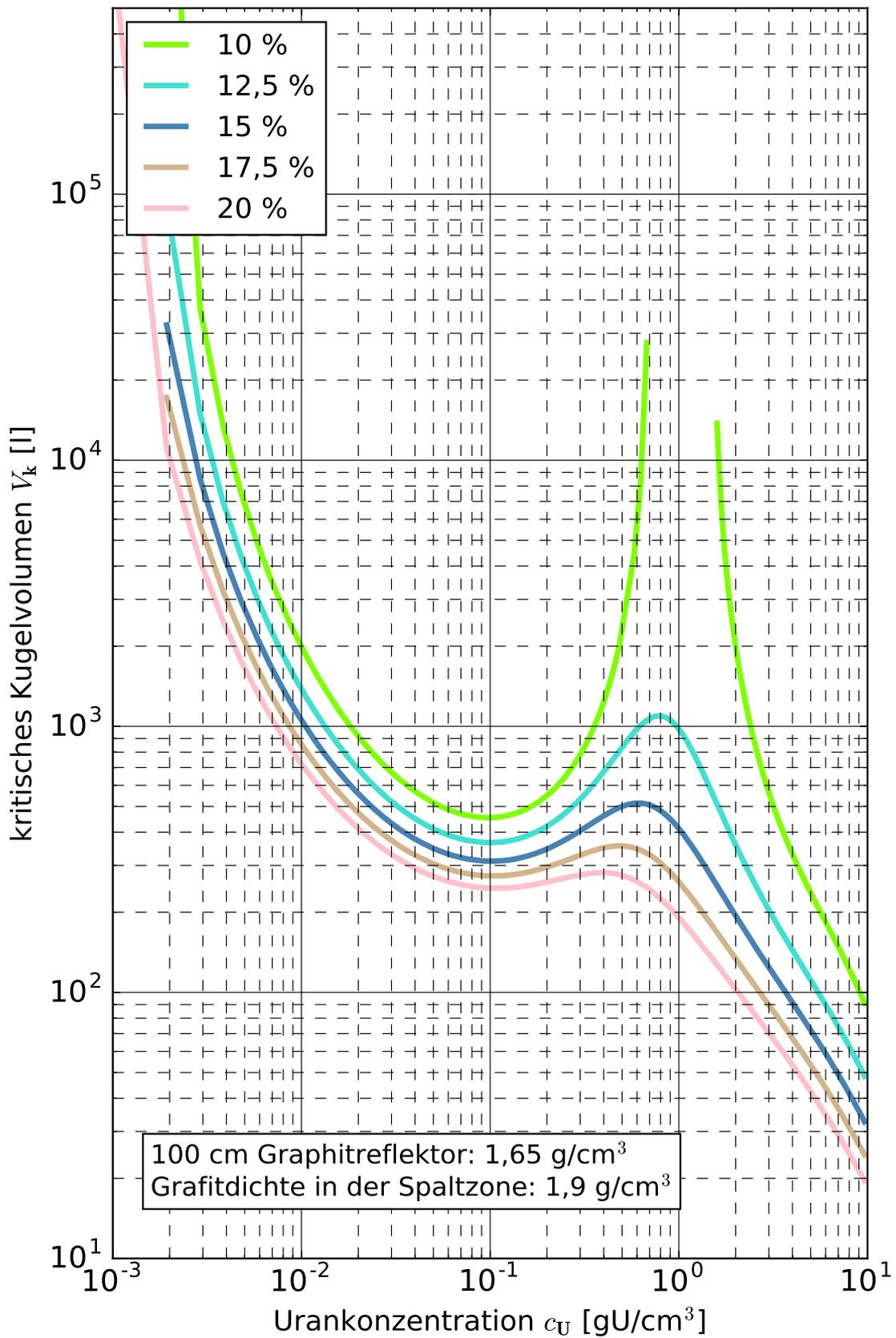


Abb. 5.B.2 Kritische Volumina von homogenen Urandioxid-Graphit-Systemen mit Graphitreflektor

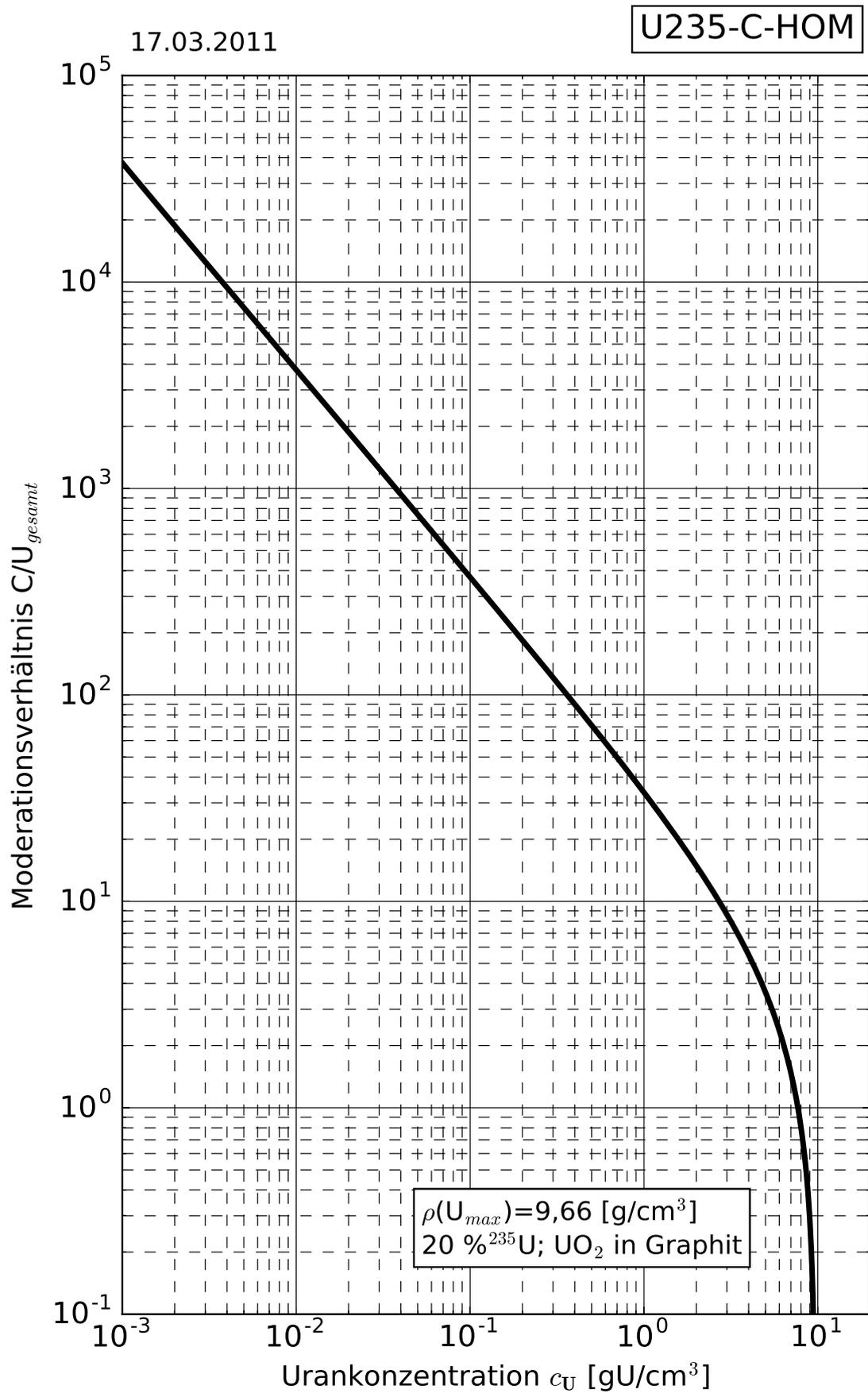


Abb. 5.B.5 Moderationsverhältnis C/U_{gesamt} von homogenen Urandioxid-Graphit-Systemen

28.03.2011

U235-C-HOM

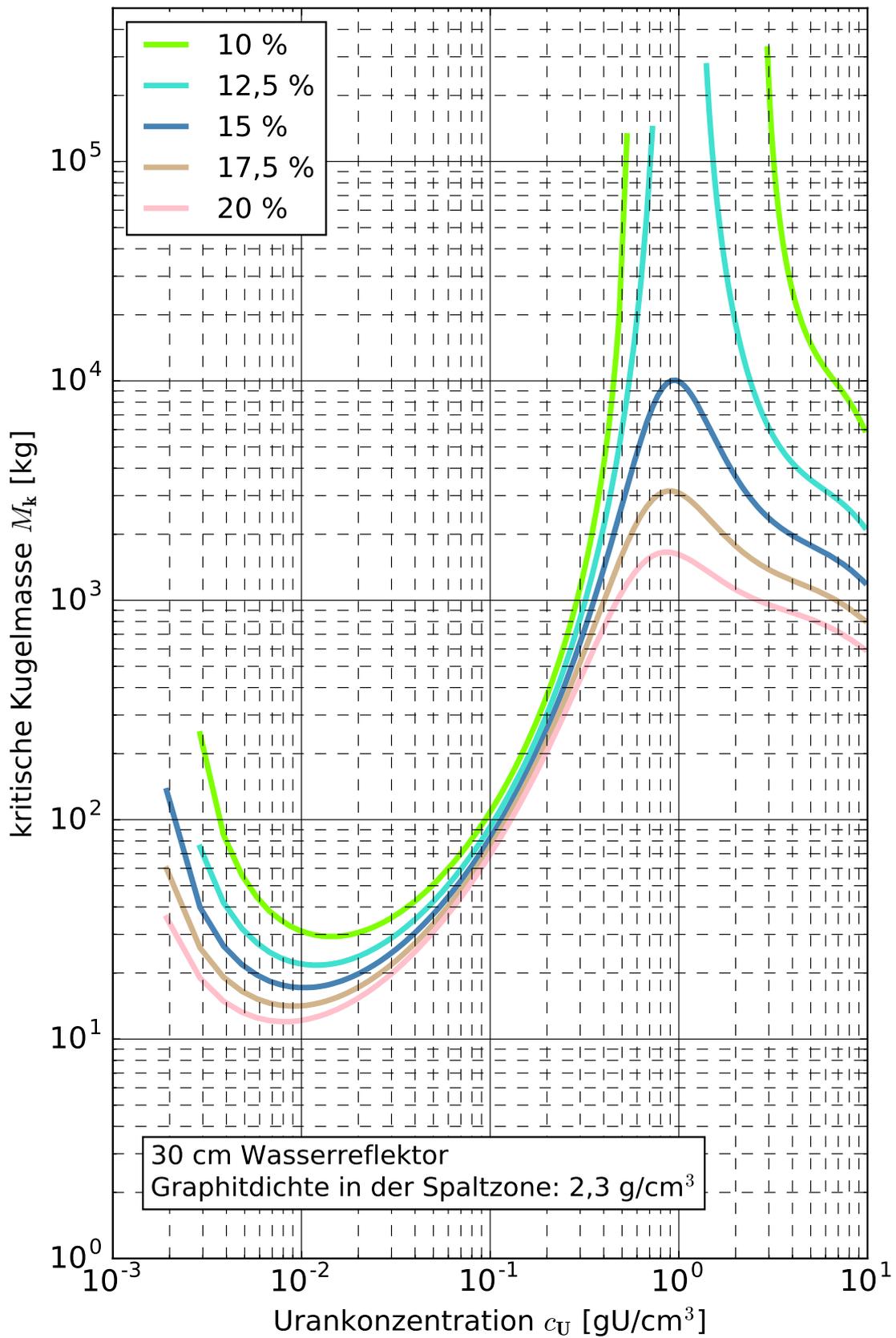


Abb. 5.B.11 Kritische Kugelmasse von homogenen Urandioxid-Graphit-Systemen mit Wasserreflektor

30.03.2011

U235-C-HOM

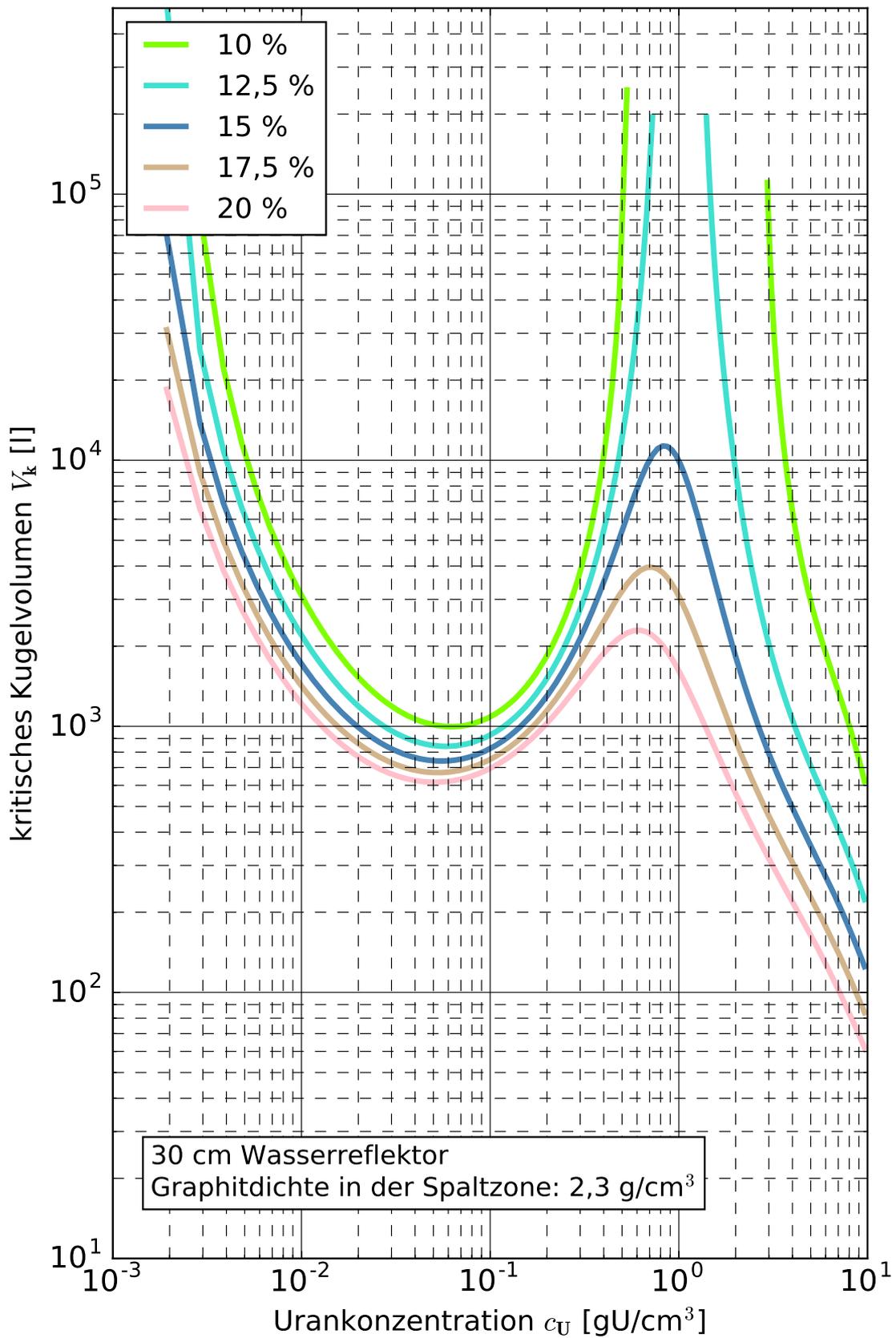


Abb. 5.B.12 Kritische Volumina von homogenen Urandoxid-Graphit-Systemen mit Wasserreflektor

7.B Homogene Urandioxid-Thoriumdioxid-Graphit-Systeme

Dieses Kapitel enthält historische Kritikalitätsparameter für Urandioxid-Thoriumdioxid-Systeme mit Graphit als Moderator. Die Kritikalitätsdaten wurden für die Kritikalitätskontrolle bei der Herstellung und Handhabung von Kernbrennstoffen und Brennelementen für den AVR und den THTR-300 berechnet. Die berechneten Daten basieren auf folgenden Randbedingungen:

- 10 Gew% $^{235}\text{UO}_2$ + 90 Gew% $^{232}\text{ThO}_2$: Abb. 7.B.1 bis Abb. 7.B.4
- bzw. 20 Gew% $^{235}\text{UO}_2$ + 80 Gew% $^{232}\text{ThO}_2$: Abb. 7.B.11 bis Abb. 7.B.14 im Gesamtoxid
- reines ^{235}U
- reines ^{232}Th
- Graphitdichte: $\rho_C = 1,9 \text{ g/cm}^3$
- Oxiddichte: $\rho_O = 10,9 \text{ g/cm}^3$

Die Kritikalitätsdaten sind für kleinere Graphitdichten $\rho_C < 1,9 \text{ g/cm}^3$ konservativ. Um Daten für Schüttungen von Partikeln zur Verfügung zu haben, wurden die Rechnungen für verschiedene Schüttdichten, ausgedrückt durch einen auf die Graphitdichte bezogenen Füllfaktor F (0,5 bis 1,0) durchgeführt. Für die Berechnungen wurden der Multigruppencode GAMTEC /CAR 65/ und das Diffusionsprogramm FOG /FLA 61/ eingesetzt.

Als Reflektor wurde eine 30 cm dicke Wasserschicht angenommen (volle Wasserreflexion). In einigen Fällen wurden auch Kritikalitätsdaten mit einem 30 cm starken Kiesbetonreflektor ($\rho = 2,33 \text{ g/cm}^3$) berechnet und zu den Werten mit 30 cm Wasserreflektor geplottet (Abb. 7.B.21). Einige kritische Massen und Dimensionen unter optimaler Moderation sind in Tab. 7.B.A und Tab. 7.B.B zusammengestellt.

Es sei darauf hingewiesen, dass die unter Kapitel 7 eingereichten Kritikalitätsdaten nur dann angewendet werden dürfen, wenn eine zusätzliche Wassermoderation (Restfeuchte, in Störfallanalysen zu unterstellende Wasserflutung o. ä.) mit Sicherheit auszuschließen ist. Ist das nicht der Fall, so müssen Daten nach Kapitel 9 oder nach Kapitel 3 benützt werden.

Tab. 7.B.A Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für graphitmoderierte, homogene UO₂(10%)ThO₂(90%)-Graphit-Systeme

Füllfaktor F	Masse [kg U]		Volumen [Liter]	
	kritisch	sicher ¹	kritisch	sicher ¹
1,0	3,6	1,4	900	450
0,74	6,5	2,6	2200	1100
0,60	9,8	3,9	4100	2050
0,50	14,2	5,6	7300	3650
1,0 30 cm Kiesbeton	3,6	1,4	900	450

¹ Sicherheitsfaktoren:

Sichere Masse $\leq 45\%$ der kritischen Masse **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

Sicheres Volumen $\leq 80\%$ des kritischen Volumens **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

Tab. 7.B.B Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für graphitmoderierte, homogene UO₂(10%)ThO₂(90%)-Graphit-Systeme

Füllfaktor F	Durchm. eines infiniten Zylinders [cm]		Dicke einer infiniten Schicht [cm]	
	kritisch	sicher ¹	kritisch	sicher ¹
1,0	87	65	49	36
0,74	117	87	67	50
0,60	144	108	83	62
0,50	174	130	100	75
1,0 30 cm Kiesbeton	81	60	38	28

¹ Sicherheitsfaktoren:

Sichere Dimension $\leq 90\%$ der kritischen Dimension **und** $k_{\text{eff}} \leq 0,98$

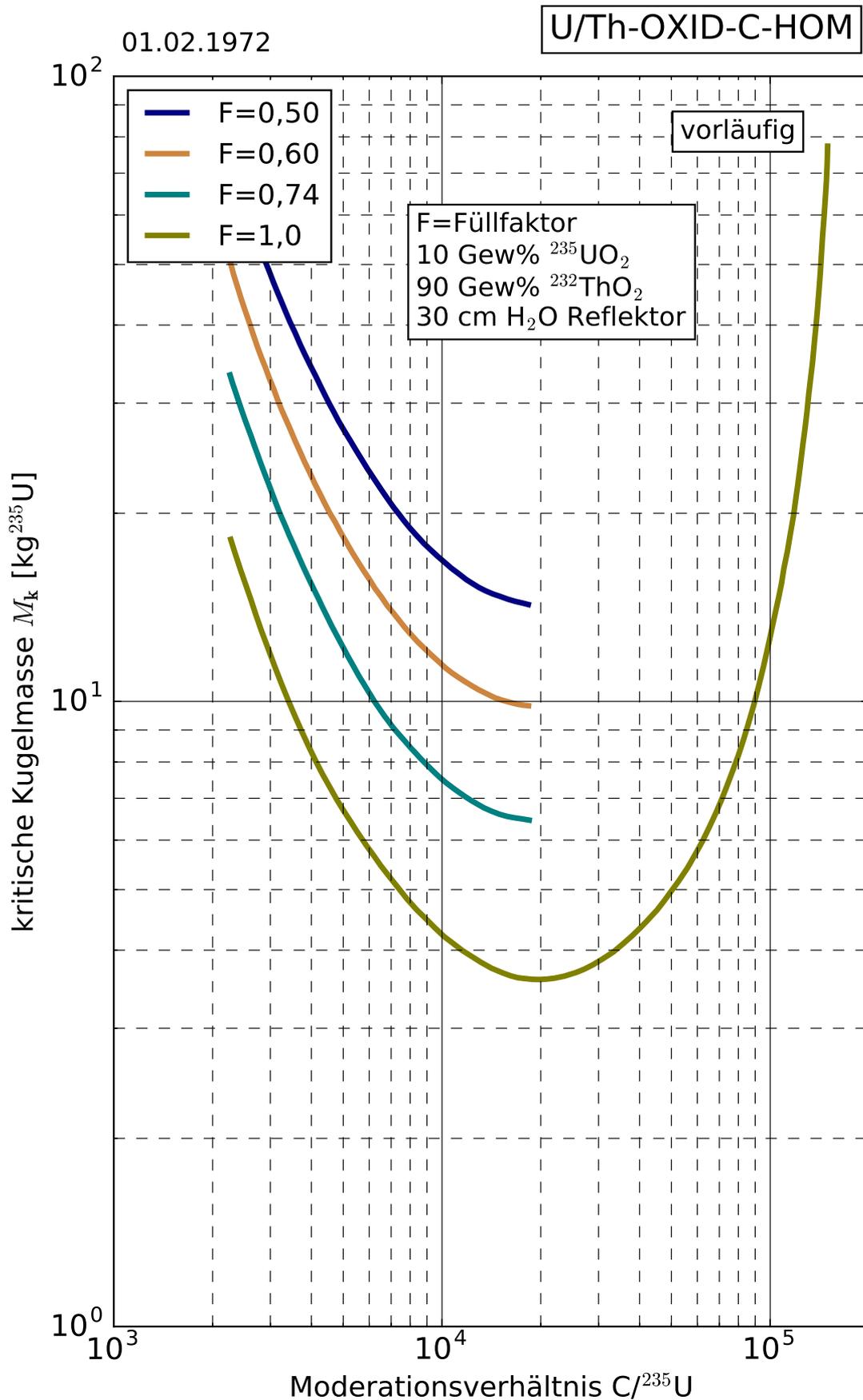


Abb. 7.B.1 Kritische Kugelmasse von homogenen Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systemen

01.02.1972

U/Th-OXID-C-HOM

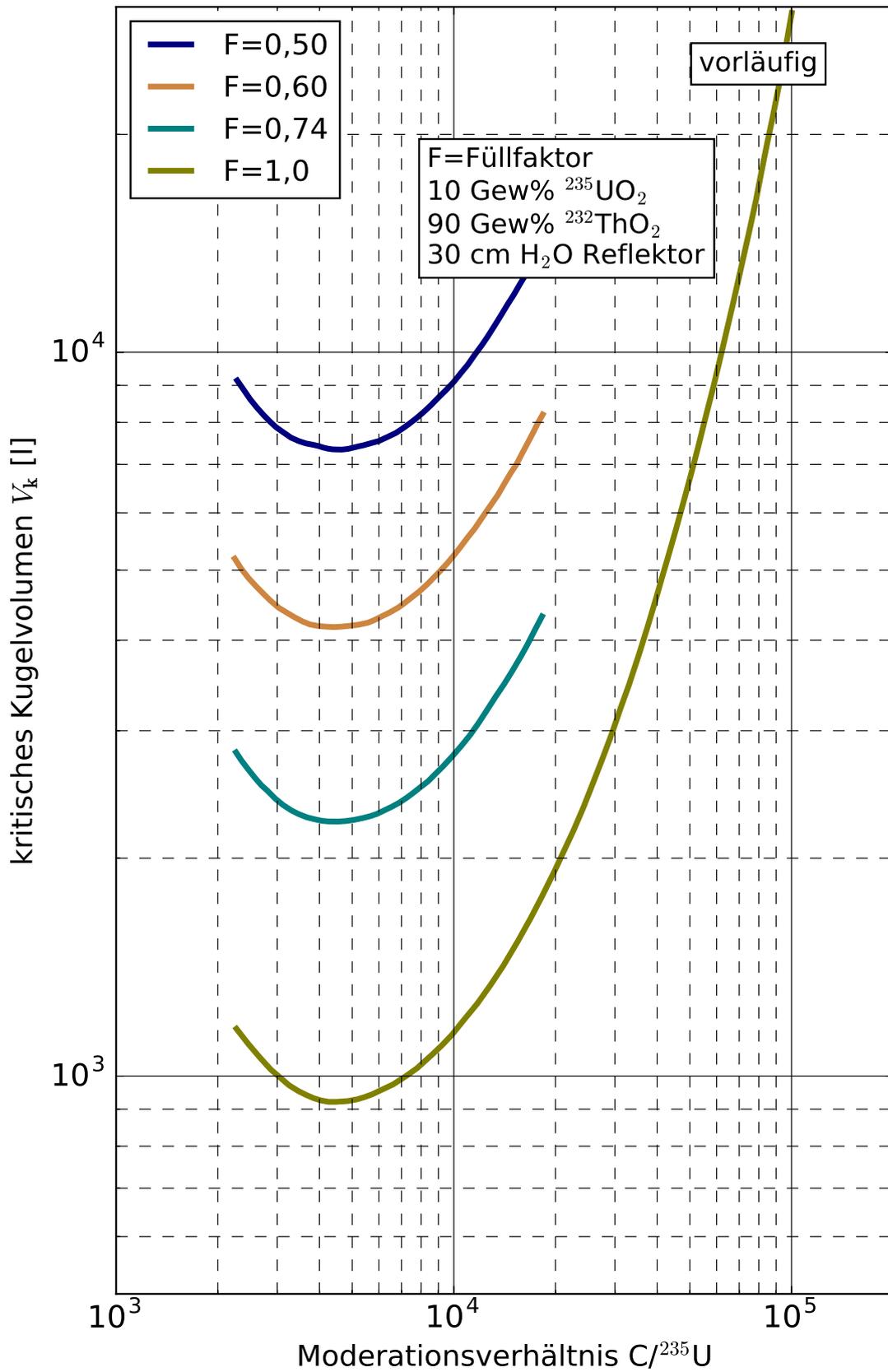


Abb. 7.B.2 Kritisches Kugelvolumen von homogenen Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systemen

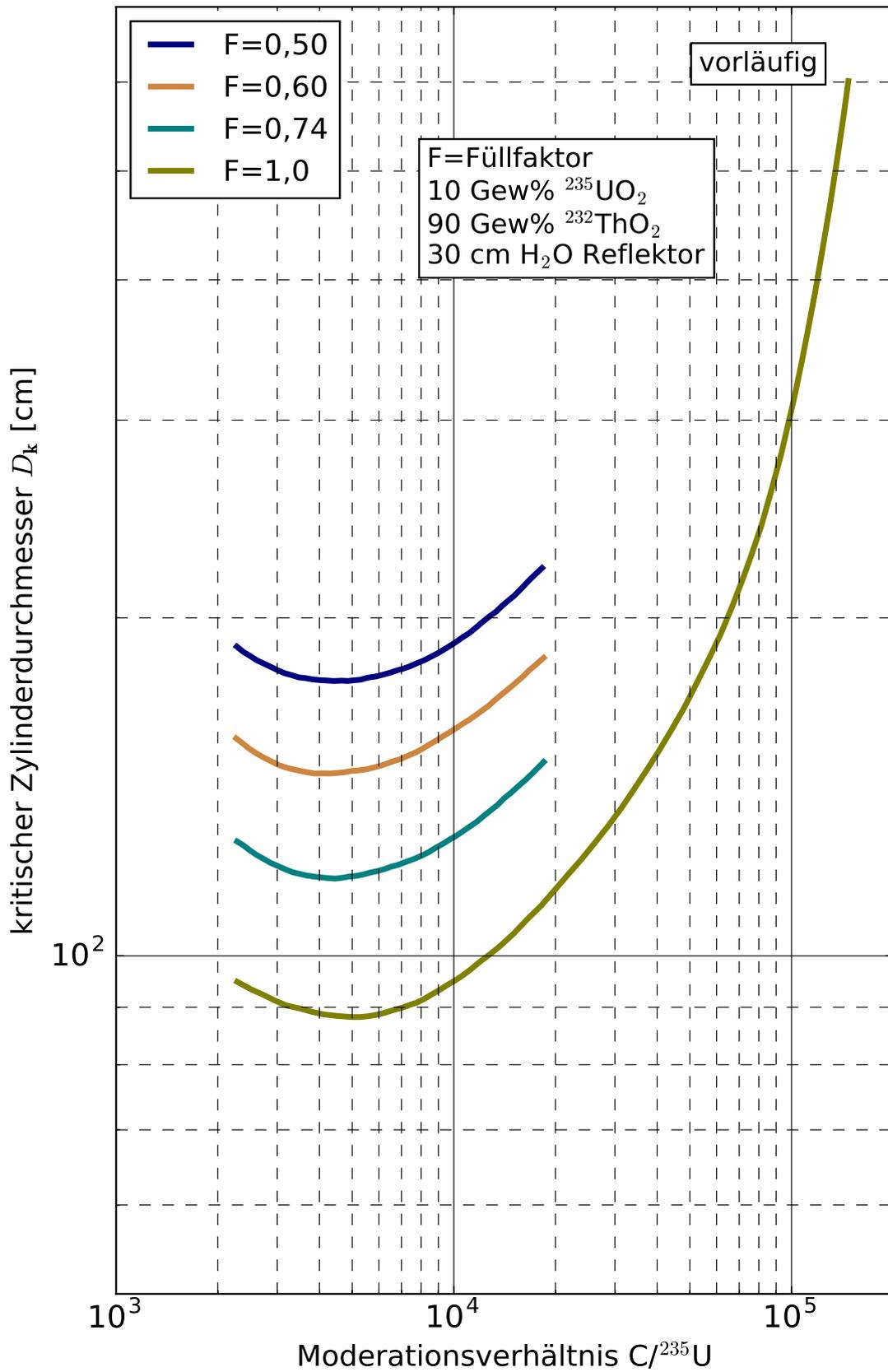


Abb. 7.B.3 Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systemen

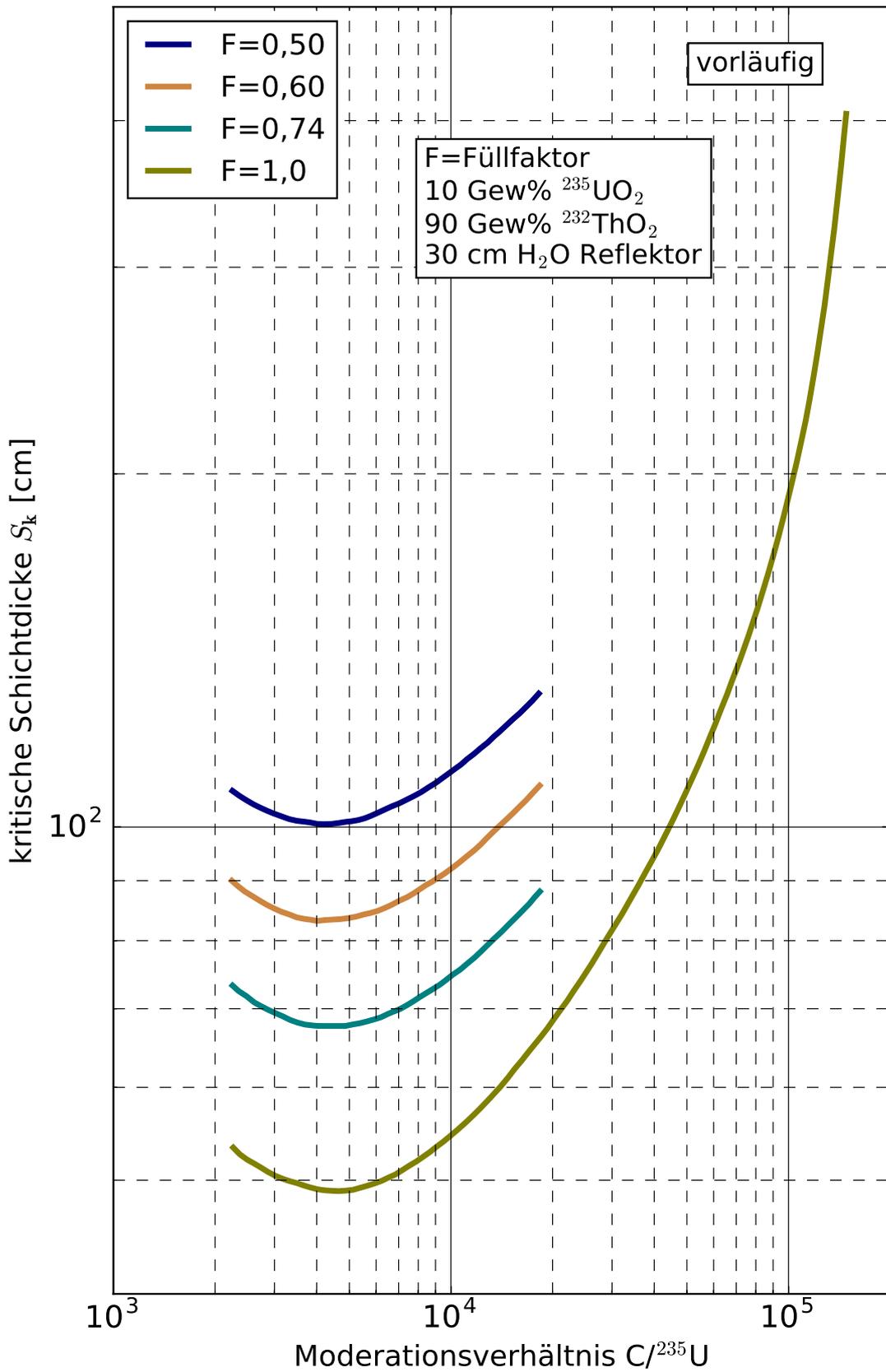


Abb. 7.B.4 Kritische Schichtdicke für homogene Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme

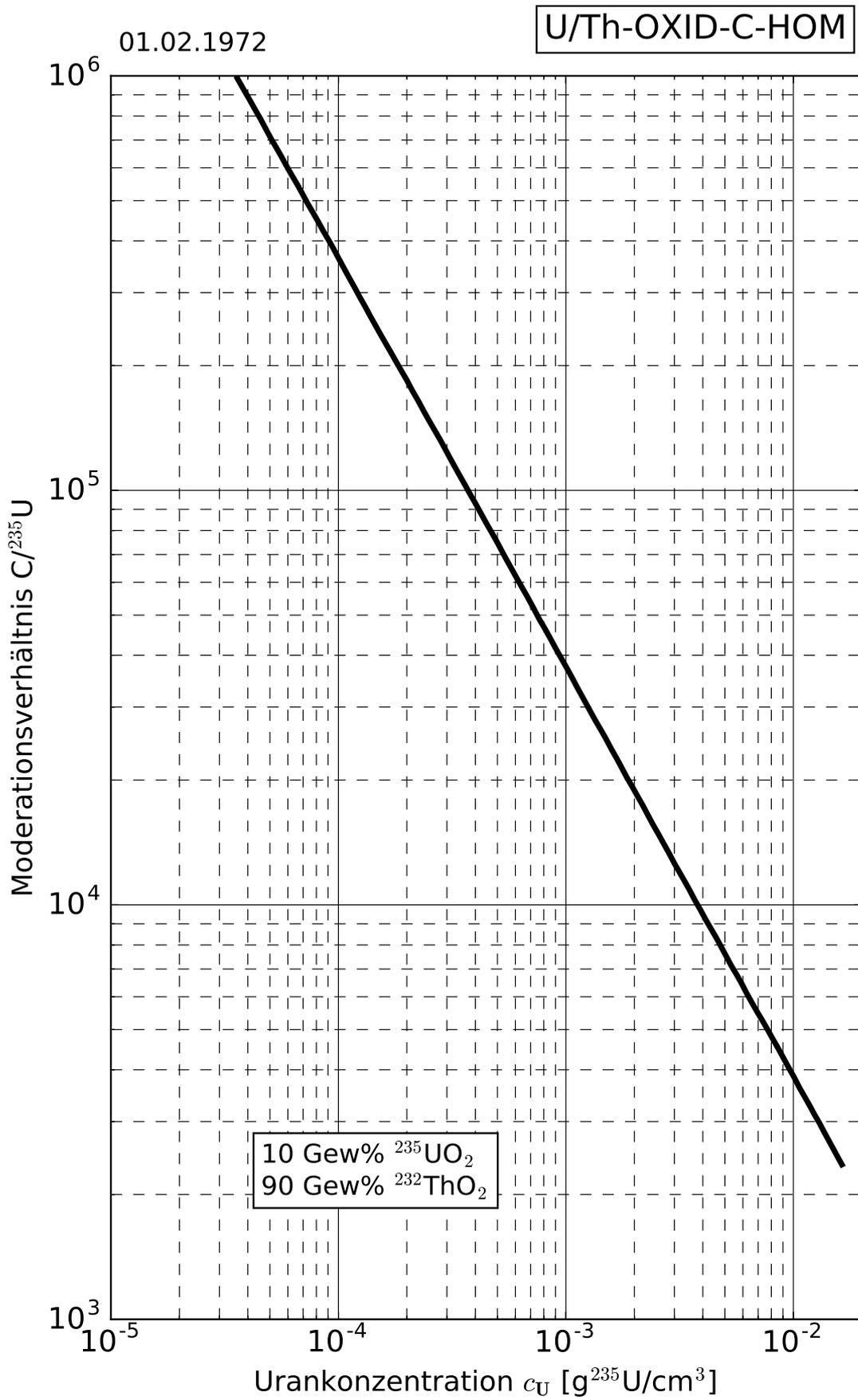


Abb. 7.B.5 Moderatorionsverhältnis für homogene Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme

01.02.1972

U/Th-OXID-C-HOM

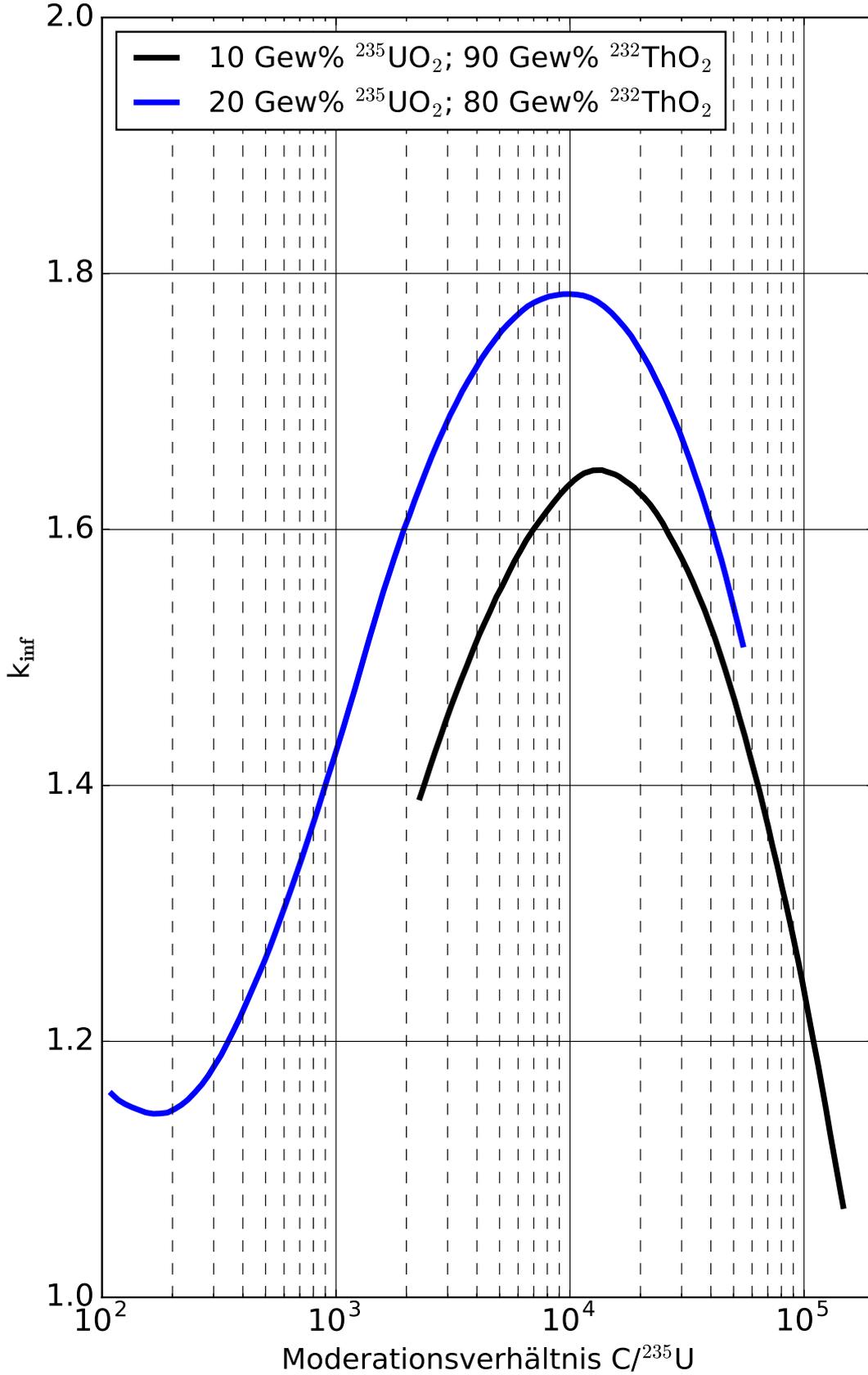


Abb. 7.B.6 Infiniter Multiplikationsfaktor für homogene Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme

29.02.1972

U/Th-OXID-C-HOM

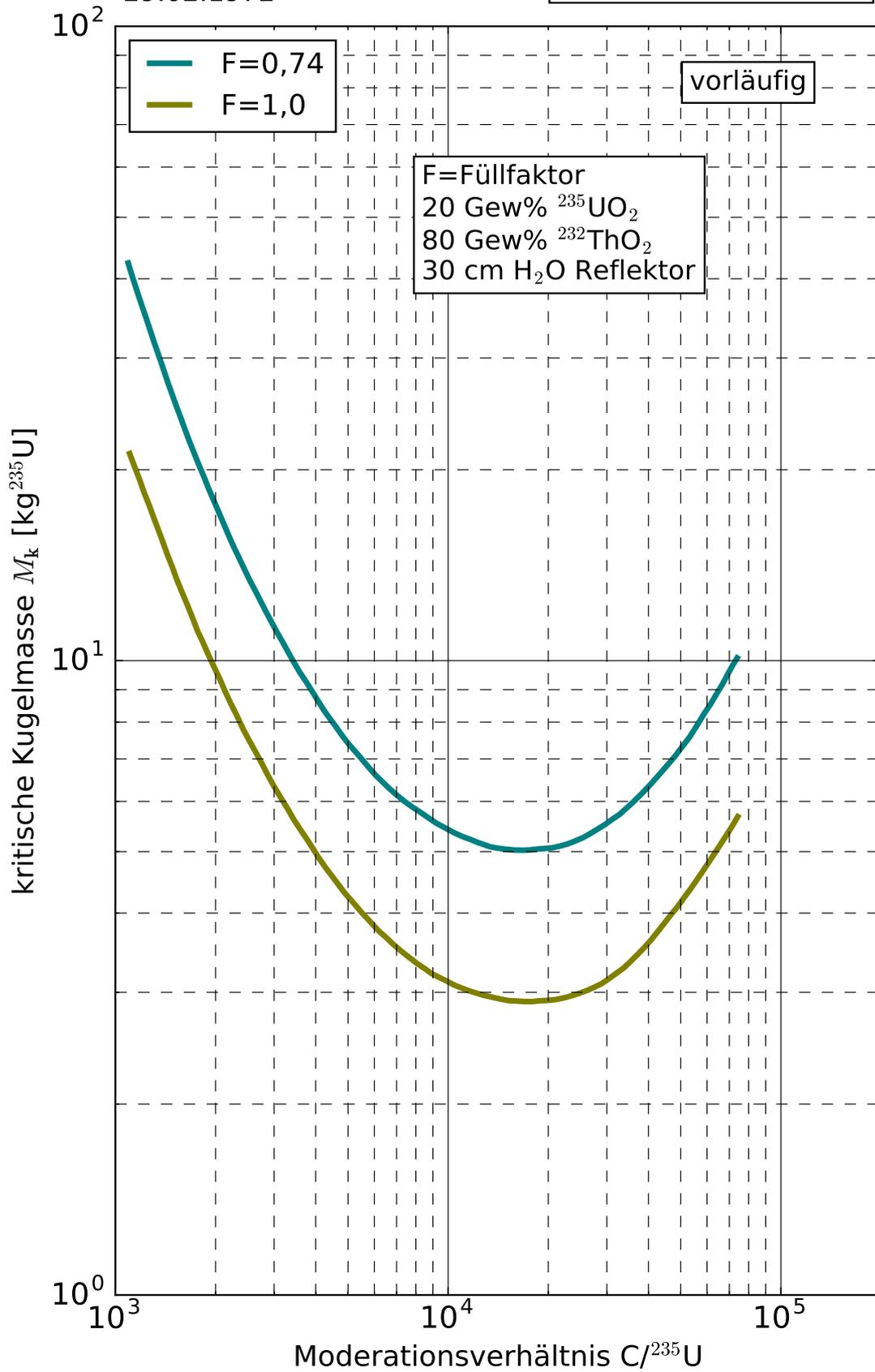


Abb. 7.B.11 Kritische Kugelmasse von homogenen Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systemen

29.02.1972

U/Th-OXID-C-HOM

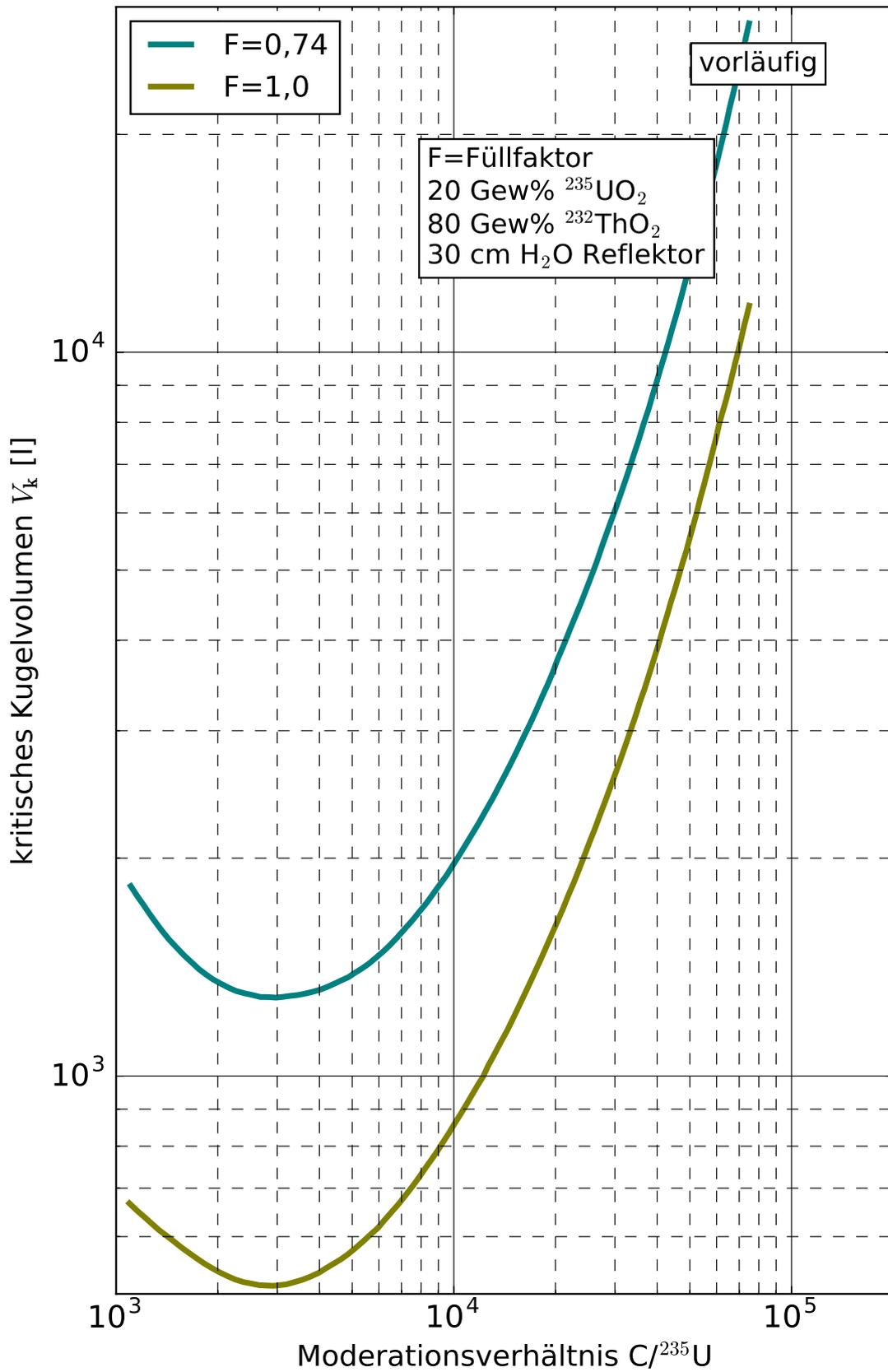


Abb. 7.B.12 Kritisches Kugelvolumen von homogenen Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systemen

29.02.1972

U/Th-OXID-C-HOM

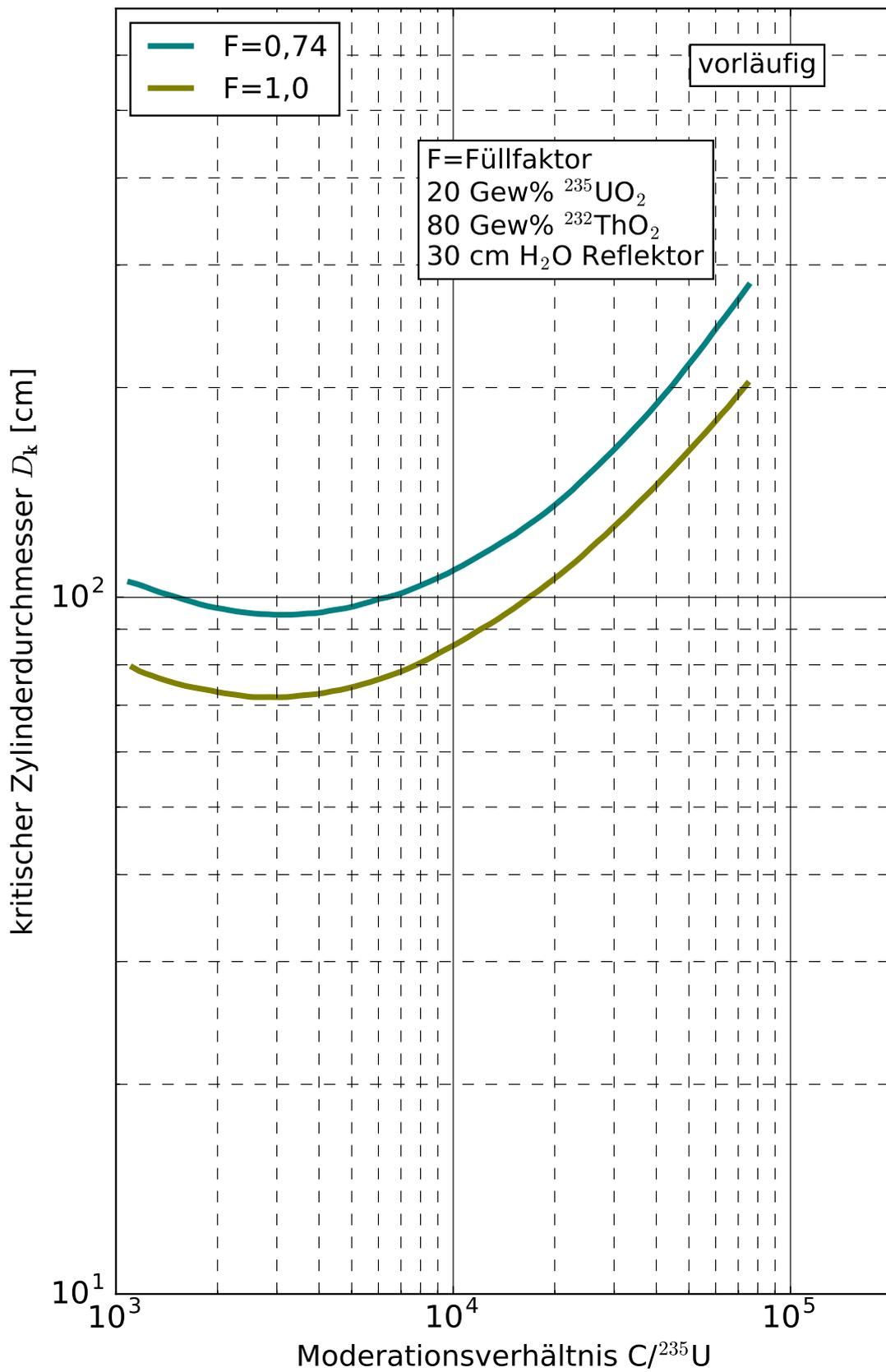


Abb. 7.B.13 Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systemen

29.02.1972

U/Th-OXID-C-HOM

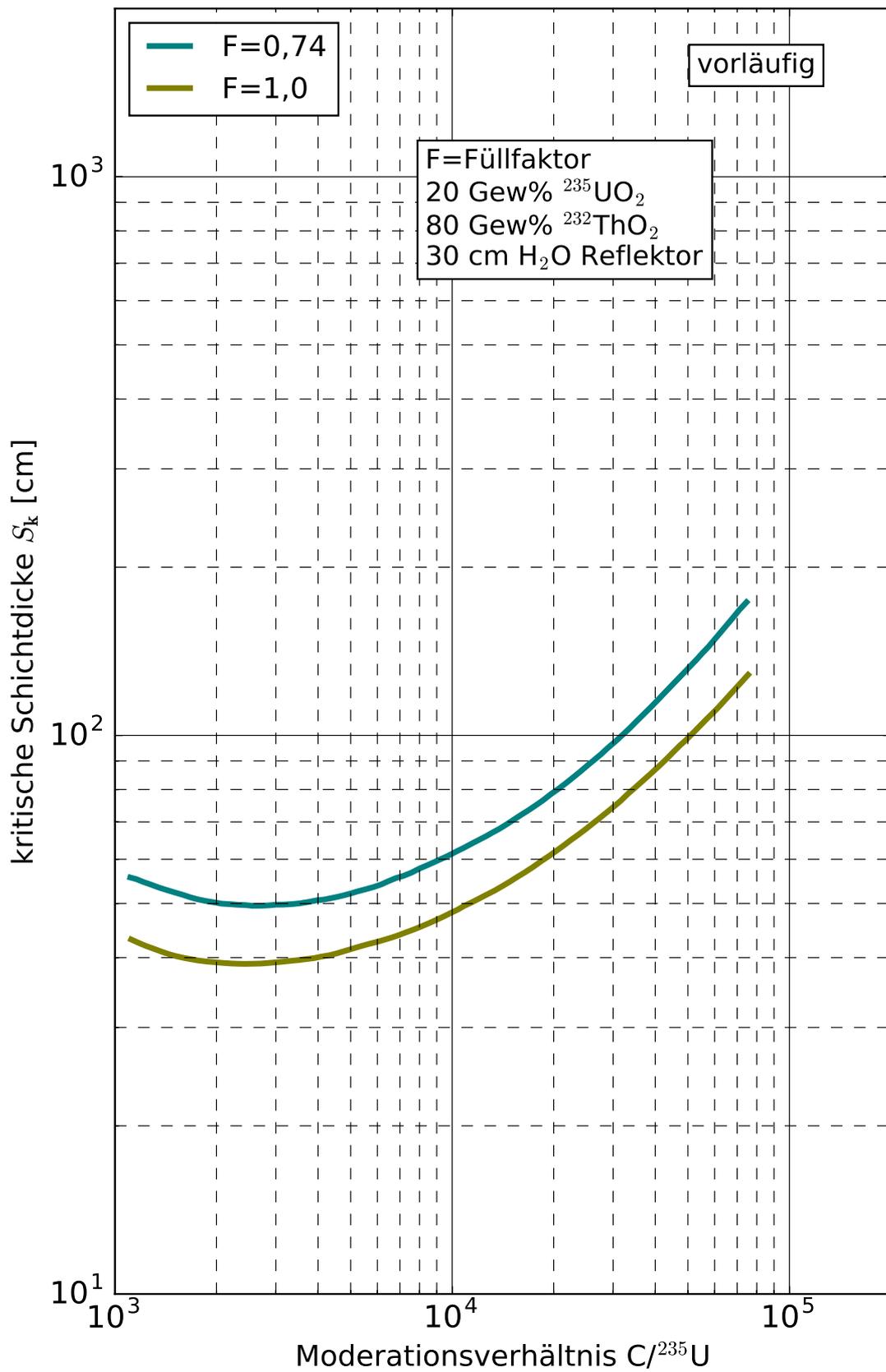


Abb. 7.B.14 Kritische Schichtdicke für homogene Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme

08.02.1972

U/Th-OXID-C-HOM

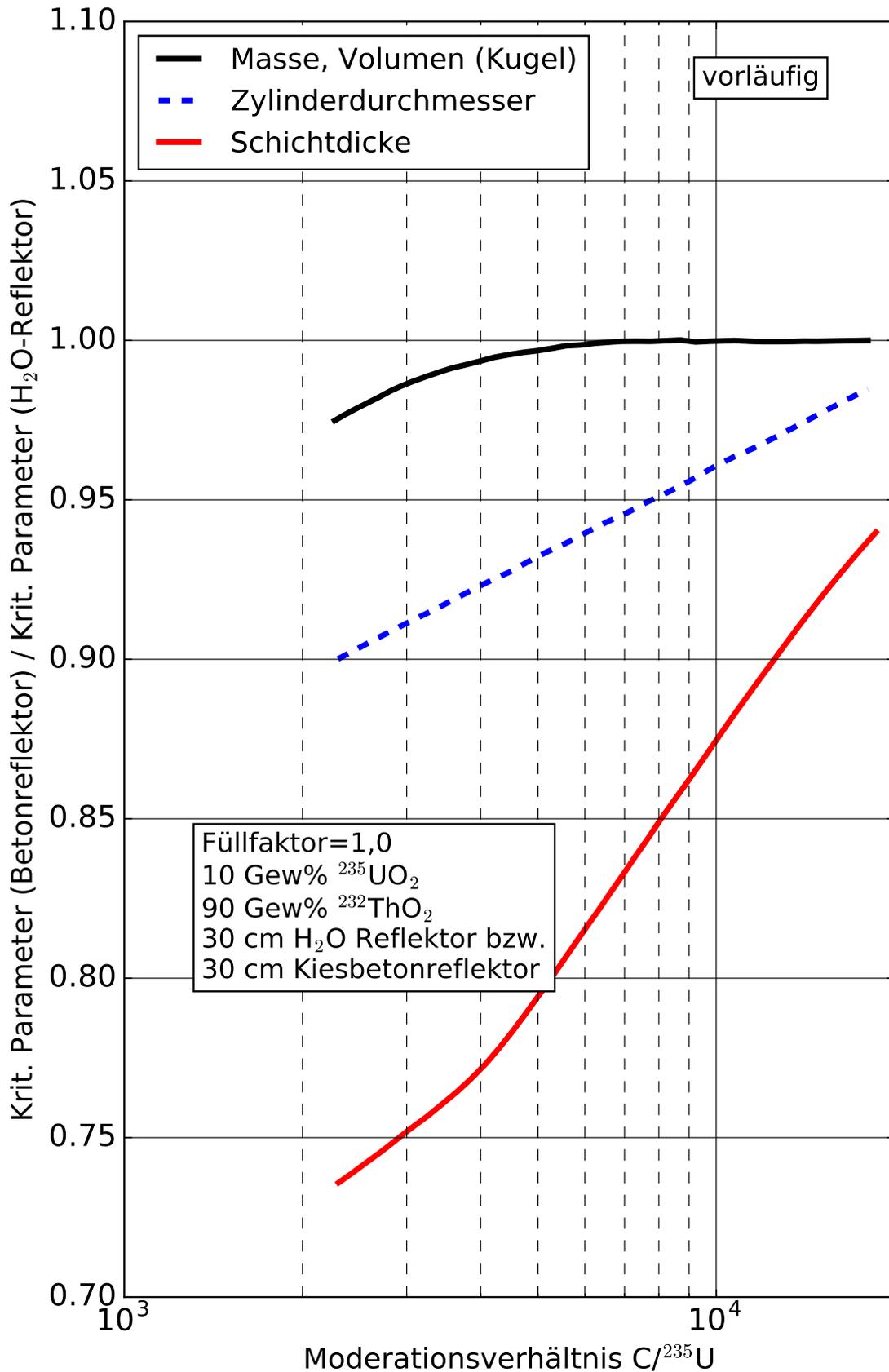


Abb. 7.B.21 Verhältnis kritischer Werte für homogene Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme mit starkem Betonreflektor zu kritischen Werten mit starkem Wasserreflektor

9.B Homogene Urandioxid-Thoriumdioxid-Systeme mit Graphit-Wasser-Moderation

In diesem Kapitel sind als Ergänzung zu Kapitel 7.B einige Kritikalitätsparameter für die im Kapitel 7.B behandelten Spaltstoffsysteme mit gemischter Graphit-Wasser-Moderation berechnet worden. Graphit und Wasser sind in diesen Rechnungen **homogen** mit dem Spaltmaterial vermischt. Als Moderationsbereich wurde das leicht untermoderierte Gebiet C/²³⁵U zwischen 2.000 und 4.500 gewählt, wie es den THTR-300- bzw. den thoriumhaltigen AVR-Brennstoffen entspricht. Als Reflektor wurde eine 30 cm dicke Wasserschicht angenommen (volle Wasserreflexion).

Bei der homogenen Mischung von Wasser und Graphit als Moderator mit dem Spaltmaterial erfolgt mit zunehmendem Wassergehalt eine beachtliche Reaktivitätszunahme. Als Füllfaktoren wurden $F = 0,74$ (dichteste Kugelpackung) und $F = 0,60$ (statische Kugelschüttung) angenommen.

Bleiben die Brennelementkugeln intakt und kann eindringendes Wasser lediglich die Zwischenräume zwischen den Kugeln ausfüllen, so verursacht das Wasser neben seiner Moderatorwirkung unter Umständen einen Entkopplungseffekt. Für derartige Fälle, in denen Wasser nicht mehr unbedingt reaktivitätserhöhend wirkt, sollten geeignete Berechnungen unter Berücksichtigung der heterogenen Spaltstoff-Moderator-Verteilung durchgeführt werden.

Tab. 9.B.A Kritische Kritikalitätsdaten für homogene $\text{UO}_2(10\%)\text{ThO}_2(90\%)$ -Graphit-Wasser-Systeme; reaktivster $\text{H}/^{235}\text{U}$ -Moderationsgrad, der bei einem vorgegebenen C/U-Verhältnis bei Füllung des Restvolumens (1-F) mit Wasser erreichbar ist

Füllfaktor F	Moderations- verhältnis	Masse	Volumen	Durchmesser eines infiniten Zylinders	Dicke einer infiniten Schicht
	[C/²³⁵U]	[kg ²³⁵U]	[Liter]	[cm]	[cm]
1,0	2267	2,5	215	52	26,4
0,74	4572	4,2	700	80	47,0
0,60	2267			65	37,0
0,50	4572			100	57,0

Bei der Ableitung sicherer Werte sollten die für Tab. 7.B.A und Tab. 7.B.B angegebenen Sicherheitsfaktoren nicht überschritten werden.

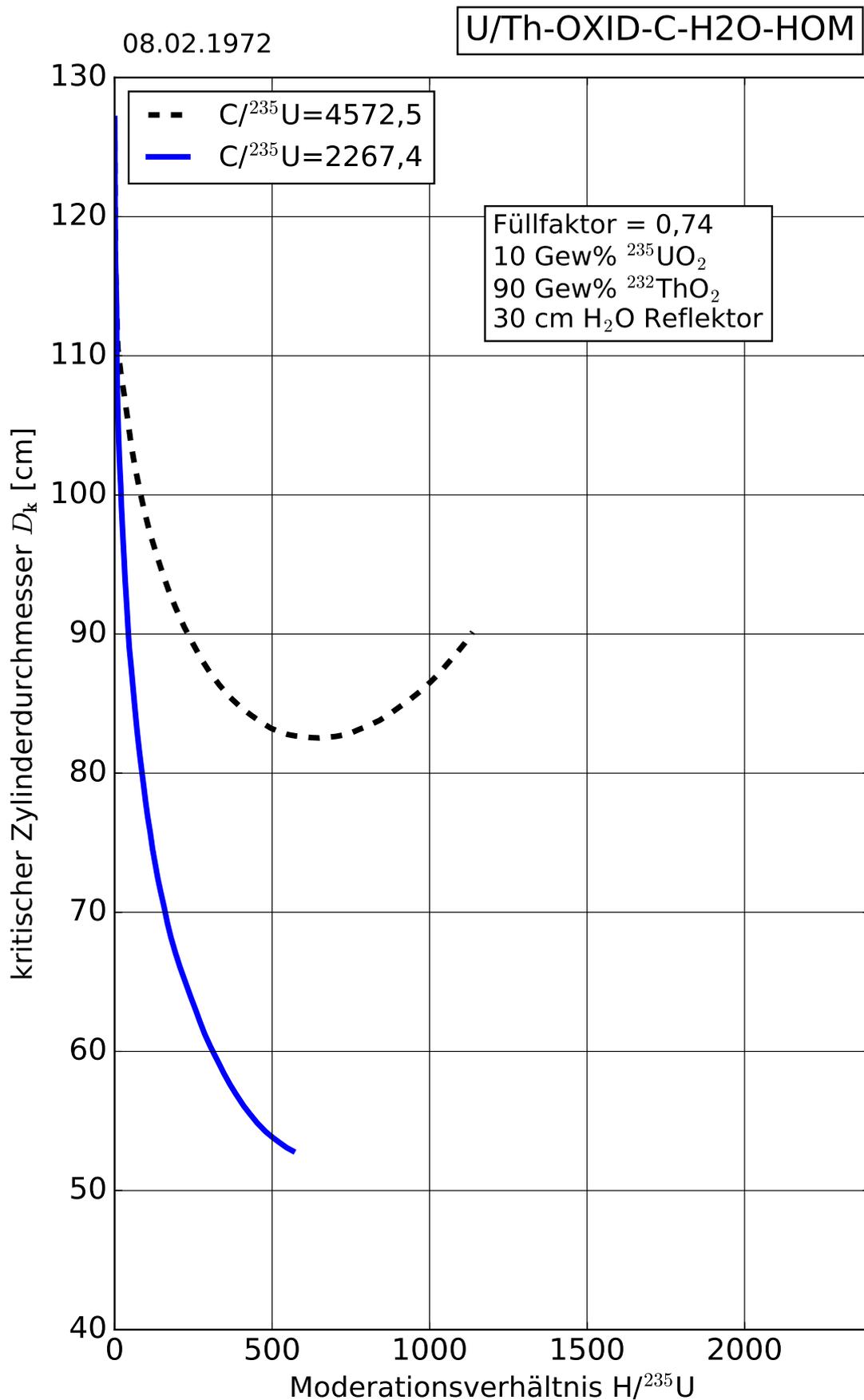


Abb. 9.B.3.a Kritischer Zylinderdurchmesser für homogene Graphit-wassermodierte Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme

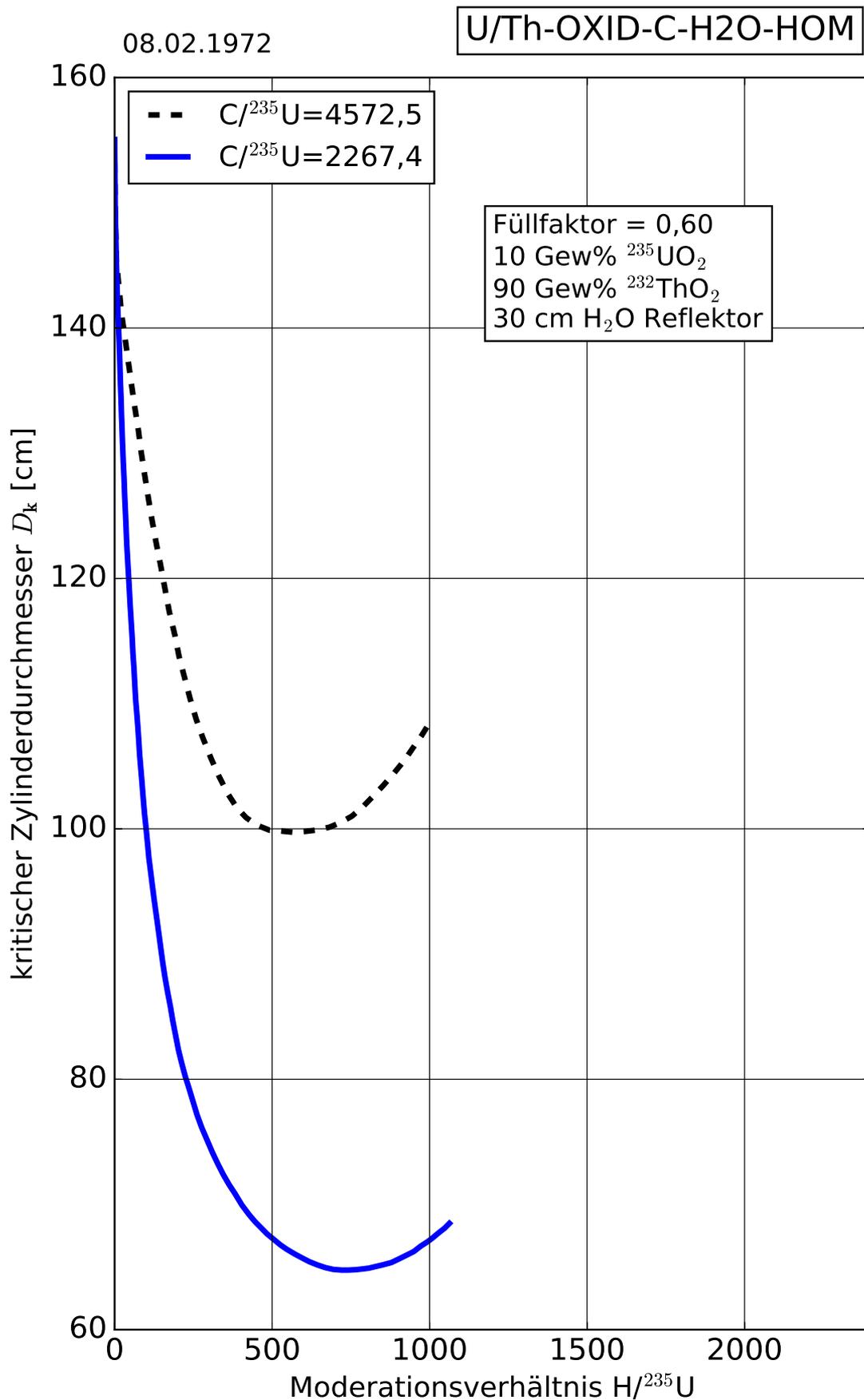


Abb. 9.B.3.b Kritischer Zylinderdurchmesser für homogene Graphit-wassermodierte Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme

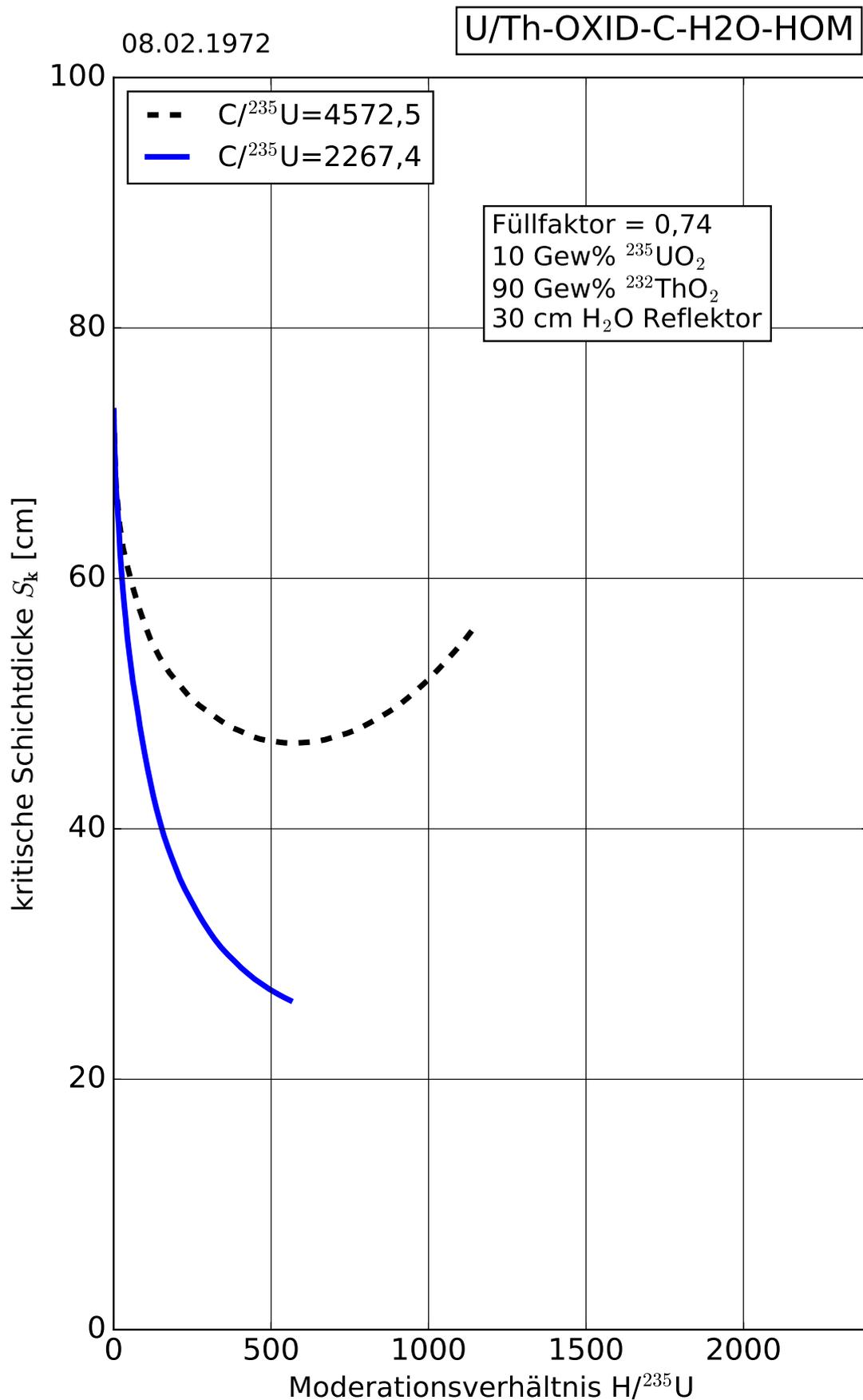


Abb. 9.B.4.a Kritische Schichtdicke für homogene Graphit-wassermodierte Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme

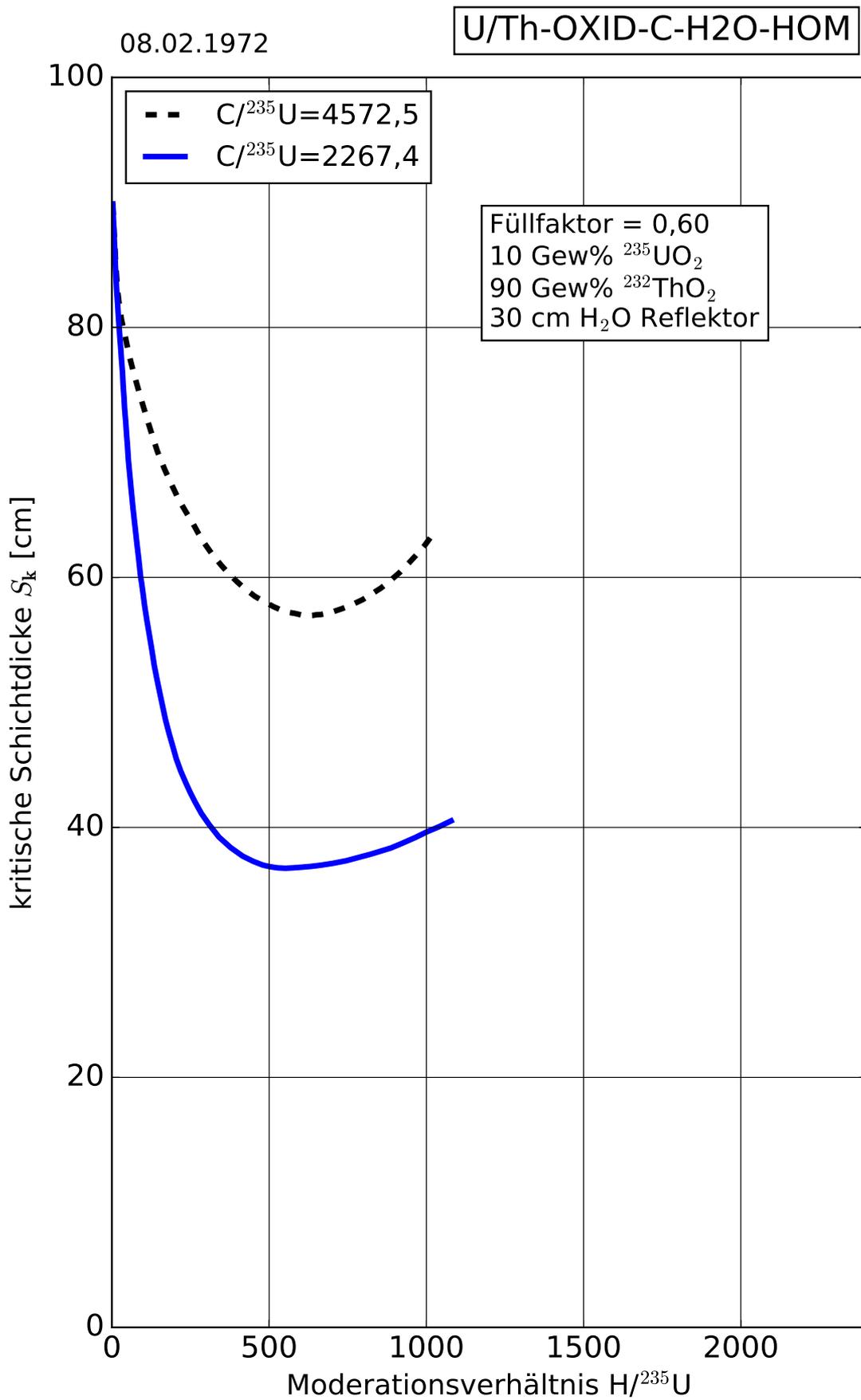


Abb. 9.B.4.a Kritische Schichtdicke für homogene Graphit-wassermodierte Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme

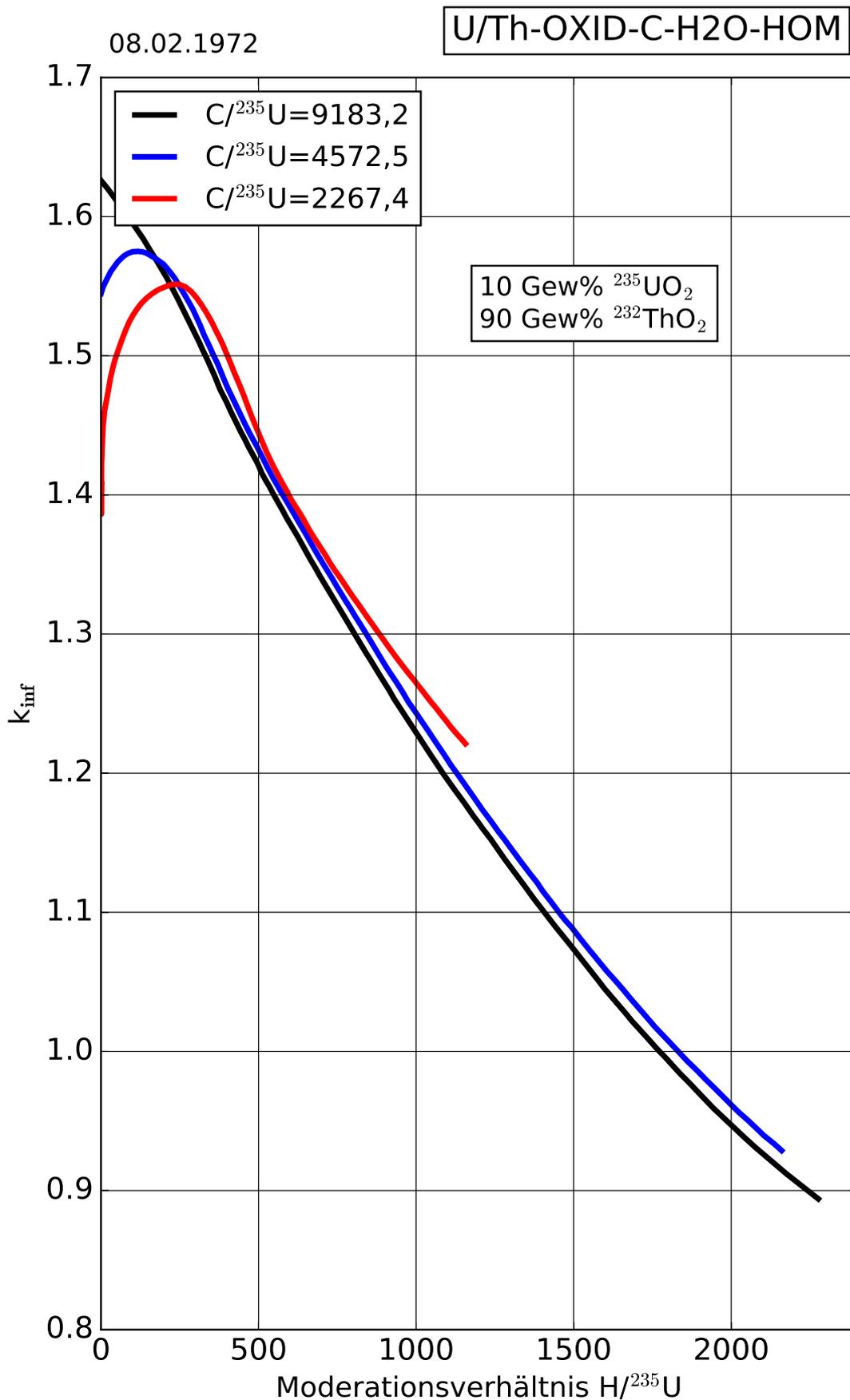


Abb. 9.B.6 Infiniter Multiplikationsfaktor für homogene Graphit-wassermodierte Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme

Literaturverzeichnis

- /ANL 63/ ANL: Reactor Physics Constants. ANL 5800, p.213, July 1963.
- /ANN 96/ J. Anno: Renouvellement du Standard de Criticité - Valeurs minimales critiques, Phase I Compilation comparative - etat des connaissances. IPSN SEC/DI 96/16 (Rev. 01/07/96).
- /ANS 61/ ANS: Nuclear Safety Guide. TID 7016, 1961.
- /BAE 64/ W. Baer, I. Hardy at el.: Study of a Slightly Enriched UO₂-Lattice with Hydrogen/Uranium = 0,42. Measurements and Analysis. Trans. ANS 7,1, p.80, 1964.
- /BAI 63/ Baird, Boynton: Bucklings, Disadvantage Factors and 28 Measurements in Sime Undermoderated Slightly Enriched Cores. Trans. ANS 6, p.248, 1963.
- /BIE 67/ S.R. Biermann, G.M. Hess: Minimum Critical ²³⁵U Enrichment of Homogeneous Hydrogeneous Uranyl Nitrate Systems. BNWL-SA-1379, 1967.
- /BIE 68/ S.R. Biermann, G.M. Hess: ORNL-CDC-5, 1968.
- /BOY 66/ A.R. Boynton, E.M. Pennington: Critical Experiments and Calculations in Some Very Undermoderated, Slightly Enriched Uranium Oxide-Water lattices. Trans. ANS 9,1, p.129, 1966.
- /BRA 73/ S.G. Brandberg: The Conversion of Uranium Hexafluoride to Uranium Dioxide. Nucl. Techn., Vol. 18, p. 177, 1973.
- /BRO 61/ C.L. Brown: Calculated Critical Parameters for Slightly Enriched Uranium Rods in Light Water. HW 69273, 1961.
- /BRO 71/ C.L. Brown: Criticality Safety Considerations in the Fabrication of UO₂ and PuO₂-UO₂-Fuels for Light Water Reactors. ANS. Trans. 14,2, p. 681, 1971.

- /BUC 80/ J.A. Bucholz: SCALE, a Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation. NURG CR 0200, ORNL/NUREG/CSD-2, August 1980.
- /CAR 65/ L.L. Carter, C.R. Richey, C.E. Hughey: GAMTEC II, A Code for Generating Consistent Multigroup Constants Utilized in Diffusion and Transport Theory Calculations. BNWL-35, 1965.
- /CAR 68/ R.D. Carter, G.R. Kiel, K.R. Ridgway: Criticality Handbook, ARH 600, Vol. I-III. 1968-72.
- /CHA 65/ I.H. Chalmers, G. Walker, L. Pugh: Handbook of Criticality Data. UKAEA, 1965/67.
- /CHA 11/ M.B. Chadwick et al.: ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data, NuclearData Sheets, 112, pp. 2887-2996, 2011.
- /CHI 68/ R.A. Chitwood: The Application of the HAMMER Computer Code to Ex-Reactor Criticality Calculations. Trans. ANS 11,1, p.387, 1968.
- /CLA 65/ H.K. Clark: Maximum Safe Limits for Slightly Enriched Uranium and Uranium Oxide. SM 70/31, November 1965.
- /CLA 66a/ H.K. Clark: Nucl. Sc. And Eng. 24, pp. 133-141, 1966.
- /CLA 66b/ H.K. Clark: Critical and Safe Masses and Dimensions of Lattices of U- and UO₂-Rods in Water. DP-1014, February 1966.
- /DUB 67/ Dubovskij et al.: Critical Parameters of Fissionable Materials, System and Nuclear Safety, IPRS-42322 (USSR), 1967.
- /DUN 69/ D.L. Dunaway, W.A. Johnson: Increasing Maximum Enrichment Processing Capability Through Criticality Calculations. Tran. ANS 12,1, p. 339, 1969.

- /FLA 61/ H.P. Flatt: The FOG One-dimensional Neutron Diffusion Equations Codes. NAA SR 6104, August 1961.
- /GRA 70/ A.W. Gray, L.L. Jones: Minimum Critical Mass of ²³⁵U Reflected by Natural Uranium in Water. Trans ANS 13.1., p. 382, 1970.
- /GRE 69/ N.M. Greene, C.W. Craven jr.: XSDRN, a Discrete Ordinates Spectral Averaging Code. ORNL-TM-2500, July 1969.
- /HAN 61/ G.E. Hansen, W.H. Roach: Six and Sixteen Group Cross Sections for Fast and Intermediate Critical Assemblies. LAMS-2543, 1961.
- /HOM 11/ G. Hommel: Handbuch der gefährlichen Güter (Handbook of Dangerous Goods). CD-ROM „Hommel interaktiv“ ab Version 10.0, Springer-Verlag, Heidelberg, 2011.
- /HON 61/ H.C. Honeck: THERMOS, A Thermalization Transport Code for Reactor Lattice Calculations. BNL 5826, 1961.
- /IAE 62/ IAEA: Light Water Lattices. IAEA Technical Reports Series No.12, Vienna, 1962.
- /JAN 72/ J. Janov, P.G. Alfredson, V.K. Vilkaitis: The influence of precipitation conditions on the properties of ammonium diuranate and uranium dioxide powders. 42 (2), S.161-174, 1972.
- /JAR 66/ G.A. Jarvis, C.B. Mills: Critical Mass Reduction. LA-3651, 1966.
- /JOA 63/ G.D. Joanou, J.S. Dudek: A B₃-Code for the Calculation of Fast-Neutron Spectra and Associated Multigroup Constants. GA-4265, 1963.
- /JOH 64/ E.B. Johnson, D.F. Cronin: Critical Dimensions of Aqueous UO₂F₂ Solutions Containing 4.9% ²³⁵U-Enriched Uranium. ANS Transactions 1964, p. 301.

- /JON 66/ L.L. Jones, jr., H.C. Romsburg: Critical Dimensions of ^{235}U Aqueous Systems Containing ^{238}U or ^{232}Th . WAPD-TM-632, 1966.
- /JOR 92/ W.C. Jordan, J.C. Turner, Estimated critical conditions for $\text{UO}_2\text{F}_2\text{-H}_2\text{O}$ -Systems in fully water-reflected spherical geometry. ORNL/TM-12292, Oak Ridge, USA, 1992.
- /KIL 09/ R. Kilger, F.E. Moser, M. Behler: Neuberechnung von kritischen Parametern und deren Validierung für das GRS „Handbuch zur Kritikalität“, Ausgabe 2009, Abschlussbericht zu Arbeitspaket 2 des Vorhabens 3606R02536. Garching, GRS-A-3532, Oktober 2009.
- /KIL 13/ R. Kilger, M. Bock, F. Rowold, V. Hannstein, M. Behler, E.F. Moser: Bereitstellung von Daten und Methoden zur Beurteilung der Sicherheit bei der nuklearen Ver- und Entsorgung sowie innovativer Kernbrennstoffkonzepte - Abschlussbericht zum Vorhaben 3610R03350. Garching, GRS-A-3701, März 2013.
- /KUP 70/ A.F. Kupinski, H. Toffer: Use of the HAMMER-System for Evaluating Light Water-Moderated Critical Assemblies. DUN 7286, 1970.
- /LAT 65/ K.D. Lathrop: DTF IV, A FORTRAN IV Program for Solving the Multigroup Transport Equation with Anisotropic Scattering. LA-3373, 1965.
- /LEC 65/ J. Leclerc et al.: Guide de Criticité, I, II, III. 1965.
- /LÉC 73/ P.R. Lécorché: Critical Mass Laboratory Program in France. ANS-Transactions 16,1, p. 158, June 1973.
- /LID 10/ David R. Lide (Hrsg.): CRC Handbook of Chemistry and Physics. 90. Auflage. (Internet-Version: 2010), CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, FL, Properties of the Elements and Inorganic Compounds, S. 4-97.
- /MAR 60/ G.I. Marchuk et al.: Critical Masses of Uranium-Graphite Reactors. AEC tr 4715, 1960.

- /MAU 78/ L. Maubert: Standard de Criticité - Valeurs Minimales Critiques. CEA-N-2051, Octobre 1978.
- /MEL 07/ A. Mellah, C. Chegrouche, M. Barkat: The precipitation of ammonium uranyl carbonate (AUC): Thermodynamic and kinetic investigations, J. Hydromet. 85, (2007), 2-4, 163-171.
- /MIL 68/ C.B. Mills: Low Critical Mass. Nucl. Appl. 4, p. 17/8, 1968.
- /NEE 61/ V.I. Neeley: k_{∞} of Three Weight per Cent ^{235}U Enriched UO_3 and $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ Hydrogeneous Systems. HW-66882, 1961 .
- /NEW 65/ C.E. Newlon: Minimum Critical Cylinder Diameter of Hydrogen Moderated U(4.9) Systems. K-1620, 1965.
- /NIC 66/ J.P. Nichols: Limiting Critical Concentrations of Aqueous Nitrate Solutions of Fissile and Fertile Isotopes. ORNL-TM-686, 1966.
- /OEC 06/ OECD-NEA Nuclear Science Committee: Reference Values for Nuclear Criticality Safety, NEA No. 5433, ISBN 92-64-02333-X, OECD 2006.
- /OHJ 78/ J. Oh, R.E. Rothe: A Calculational Study of Benchmark Critical Experiments on High-enriched Uranyl Nitrate Solution Systems. Nucl. Techn. 41, p. 226, 1978.
- /ORN 11/ ORNL: SCALE: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design, ORNLTM-200539, Version 6.1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, June 2011. Available from Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-785.
- /PAX 64/ H.C. Paxton, J.T. Thomas, D. Callihan, E.B. Johnson: Critical Dimensions of Systems Containing ^{235}U , ^{239}Pu and ^{233}U . TID 7028, 1964.
- /PAX 87/ H.C. Paxton, N.L. Pruvost: Critical Dimensions of Systems Containing ^{235}U , ^{239}Pu und ^{233}U , 1986 Revision, LA-10860-MS, 1987.

- /PRI 66/ G.A. Price: Uranium-Water Lattice Compilation, Part I. BNL Exponential Assemblies, BNL 50035, 1966.
- /PRU 96/ N.L. Pruvost, H.C. Paxton (ed.): Nuclear Criticality Safety Guide, LA-12808, 1996.
- /RAF 72/ S.J. Raffety, J.T. Mihalczko: Homogeneous Critical Assemblies of 2 and 3 % ²³⁵U-enriched Uranium in Paraffin. Nucl. Sc. and Eng. 48, pp. 433-443, 1972.
- /REA 17/ B.T. Rearden and M.A. Jessee, Editors: SCALE Code System. ORNL/TM-2005/39, Version 6.2, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 2017.
- /REY 58/ H.L. Reynolds: Critical Measurements and Calculations for Enriched Uranium Graphite Moderated Systems. Proc. Geneva Conf. 12, p.633, 1958.
- /RIC 65/ C.R. Richey, R.C. Lloyd, E.D. Clayton: Criticality of Slightly Enriched Uranium in Water-Moderated Lattices. Nucl. Sc. and Eng. 21, pp.217-226, 1965.
- /RID 66/ K.R. Ridgway: Calculated Nuclear Safety Parameters of Low-enriched Uranium. Trans. ANS 9,1. pp. 134-135, 1966.
- /ROA 67/ W.H. Roach, D.R. Smith: Estimates of Maximum Subcritical Dimensions of Single Fissile Metal Units. ORNL-CDC-3, 1967.
- /ROT 78/ R.E. Rothe, J. Oh: Benchmark Critical Experiments on High-enriched Uranyl Nitrate Solution Systems. Nucl. Techn. 41, p. 207, 1978.
- /RSI 95/ RSIC Computer Code Collection: SCALE 4.3 Modular Code Systems for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation for Workstations and Personal Computers, CCC-545, September 1995.

- /RSI 00/ RSIC Computer Code Collection: SCALE 4.4a Modular Code Systems for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation for Workstations and Personal Computers. NUREG/CR-0200 Rev.6, Vol. I, II, III, March 2000.
- /SCH 59/ W. Schüller, L. Lung: EUROCHEMIC Report, Criticality Study, 1959.
- /SHO 95/ N. Shobo: Nuclear Criticality Safety Handbook, English Translation by Y. Naito and H. Okuno, JAERI Review 95-013, August 1995.
- /SOM 19/ F. Sommer et al.: Neuberechnung von Kritikalitätsdaten und deren Validierung für das GRS „Handbuch zur Kritikalität“, Ausgabe 2019, Abschlussbericht zu Arbeitspaket 2 des Vorhabens 4716E03350, Garching, GRS-542, Juli 2019.
- /SPR 18/ Springer: Materialdatenbank, Urantrioxid. erreichbar unter http://materials.springer.com/isp/crystallographic/docs/sd_1904511, Stand vom 23. Januar 2018.
- /STR 63/ W.R. Stratton: Critical Dimensions of U(93)-Graphite-Water Spheres, Cylinders and Slabs. LAMS 2955, 1963.
- /STR 64/ W.R. Stratton: Criticality Data and Factors Affecting Criticality of Single, Homogeneous Units. LA-3612, July 1964.
- /STR 65/ L.E. Strawbridge, R.F. Barry: Criticality Calculations for Uniform Water-Moderated Lattices. Nucl. Sc. and Eng. 23, p.58-73, 1965.
- /SUI 67/ J.E. Suich, H.C. Honeck: The HAMMER System, Heterogeneous Analysis by Multigroup Methods of Exponentials and Reactors. DP-1064, January 1967.
- /UKA 65/ UKAEA: UKAEA-Handbook, Vol. 1. 1965/7.
- /VIE 64/ H. Vietzke: Herstellung von Urandioxid aus Uranhexafluorid. Kerntechnik g. Jg. Heft 4, p. 176, 1964.

- /WAC 63/ J.W. Wachter et al.: Y 12 Plant Nuclear Safety Handbook. Y1272, 1963.
- /WEB 84/ W. Weber: Kritikalitätsparameter für Uranyl- und Plutonium-Nitrat-Systeme in Tributylphosphat/Kerosin und Wasser. GRS-A-1038, Dezember 1984.
- /WEH 61/ D.B. Wehmeyer, K.E. Roach: Nuclear Safety of UO₂-ThO₂-H₂O-Systems, Reactor Science and Techn., 14, p.189-199, 1961.
- /WHI 69/ G.E. Whitesides, N.F. Cross: KENO II A Multigroup Monte Carlo Criticality Program. CTC-5, 1969.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.A.1	Kritische Kugelmasse von homogenen Uran-Wasser-Systemen	4
Abb. 1.A.2	Kritisches Kugelvolumen von homogenen Uran-Wasser-Systemen	5
Abb. 1.A.3	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Uran-Wasser-Systemen	6
Abb. 1.A.4	Kritische Schichtdicke von homogenen Uran-Wasser-Systemen	7
Abb. 1.A.5	Moderationsverhältnis von homogenen Uran-Wasser-Systemen	8
Abb. 1.A.6	Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen Uran-Wasser-Systemen	9
Abb. 1.A.16	Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen U-Metall- bzw. UO ₂ -Wasser-Systemen	10
Abb. 1.B.1.a	Kritische Kugelmasse von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen (1970, 1984)	16
Abb. 1.B.1.b	Kritische Kugelmasse von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen (2001, 2010)	17
Abb. 1.B.2.a	Kritisches Kugelvolumen von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen (1970, 1984)	18
Abb. 1.B.2.b	Kritisches Kugelvolumen von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen (2001, 2011)	19
Abb. 1.B.3.a	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen (1970, 1984)	20
Abb. 1.B.3.b	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen (2001, 2011)	21
Abb. 1.B.4.a	Kritische Schichtdicke von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen (1970, 1984)	22
Abb. 1.B.4.b	Kritische Schichtdicke von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen (2001, 2011)	23
Abb. 1.B.5	Moderationsverhältnis von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen	24

Abb. 1.B.6.a	Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen	25
Abb. 1.B.6.b	Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen Urandioxid-/Gadoliniumoxid-Wasser-Systemen	26
Abb. 1.B.7	Kleinste kritische Konzentration von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen	27
Abb. 1.B.8	Maximaler infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen	28
Abb. 1.B.10	Kleinste kritische Kugelmasse und kleinstes kritisches Kugelvolumen von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen	29
Abb. 1.B.11	Kleinste kritische Dimension von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen	30
Abb. 1.B.12	Kritische Kugelmasse von homogenen, untermoderierten Urandioxid-Wasser-Systemen bei verminderter Dichte, 93 % ²³⁵ U-Anreicherung ...	31
Abb. 1.B.13	Kritisches Kugelvolumen von homogenen, untermoderierten Urandioxid-Wasser-Systemen bei verminderter Dichte, 93 % ²³⁵ U-Anreicherung	32
Abb. 1.B.14	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen, untermoderierten Urandioxid-Wasser-Systemen bei verminderter Dichte, 93 % ²³⁵ U-Anreicherung	33
Abb. 1.B.15	Kritische Schichtdicke von homogenen, untermoderierten Urandioxid-Wasser-Systemen bei verminderter Dichte, 93 % ²³⁵ U-Anreicherung	34
Abb. 1.B.16	Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenem UO ₂ -Pulver mit und ohne Restfeuchte in Abhängigkeit von der Anreicherung, Gew% H ₂ O bezogen auf Oxidgewicht	35
Abb. 1.B.17	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Mischungen mit Beton in Abhängigkeit der Dicke des Betonreflektors	36
Abb. 1.B.18	Kritischer Zylinderdurchmesser von einer homogenen Mischung mit Beton in Abhängigkeit von der Dicke des Betonreflektors	37

Abb. 1.B.21	Kleinste kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen	38
Abb. 1.B.22	Kleinste kritische Schichtdicke von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen	39
Abb. 1.B.23	Kleinste kritische Schichtdicke von homogenen Urandioxid-Wasser-Systemen mit Wasser- bzw. Kiesbeton-Reflektor	40
Abb. 1.B.24.a	Multiplikationsfaktoren von 3x3 m ² großen Urandioxid-Flachbehältern in Abhängigkeit der Schichtdicke bei nicht unmittelbar anschließenden Betonreflektoren	41
Abb. 1.B.24.b	Multiplikationsfaktoren von 3x3 m ² großen Urandioxid-Flachbehältern in Abhängigkeit des Abstands bei nicht unmittelbar anschließenden Betonreflektoren	42
Abb. 1.B.25.a	Neutronenwechselwirkung zwischen zwei betonabgeschirmten 3x3 m ² großen Urandioxid-Flachbehältern: Kiesbeton 1	43
Abb. 1.B.25.b	Neutronenwechselwirkung zwischen zwei betonabgeschirmten 3x3 m ² großen Urandioxid-Flachbehältern: Kiesbeton 2	44
Abb. 1.B.25.c	Neutronenwechselwirkung zwischen zwei betonabgeschirmten 3x3 m ² großen Urandioxid-Flachbehältern: Barytbeton	45
Abb. 1.B.31.a	Kritische Kugelmasse von homogenen UO ₂ -Wasser-Systemen mit 1 % Restfeuchte	46
Abb. 1.B.31.b	Kritische Kugelmasse von homogenen UO ₂ -Wasser-Systemen mit 2 % Restfeuchte	47
Abb. 1.B.31.c	Kritische Kugelmasse von homogenen UO ₂ -Wasser-Systemen mit 3 % Restfeuchte	48
Abb. 1.B.31.d	Kritische Kugelmasse von homogenen UO ₂ -Wasser-Systemen mit 5 % Restfeuchte	49
Abb. 1.B.32.a	Kritisches Kugelvolumen von homogenen UO ₂ -Wasser-Systemen mit 1 % Restfeuchte	50
Abb. 1.B.32.b	Kritisches Kugelvolumen von homogenen UO ₂ -Wasser-Systemen mit 2 % Restfeuchte	51

Abb. 1.B.32.c	Kritisches Kugelvolumen von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 3 % Restfeuchte	52
Abb. 1.B.32.d	Kritisches Kugelvolumen von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 5 % Restfeuchte	53
Abb. 1.B.33.a	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 1 % Restfeuchte	54
Abb. 1.B.33.b	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 2 % Restfeuchte	55
Abb. 1.B.33.c	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 3 % Restfeuchte	56
Abb. 1.B.33.d	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 5 % Restfeuchte	57
Abb. 1.B.34.a	Kritische Schichtdicke von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 1 % Restfeuchte	58
Abb. 1.B.34.b	Kritische Schichtdicke von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 2 % Restfeuchte	59
Abb. 1.B.34.c	Kritische Schichtdicke von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 3 % Restfeuchte	60
Abb. 1.B.34.d	Kritische Schichtdicke von homogenen UO_2 -Wasser-Systemen mit 5 % Restfeuchte	61
Abb. 1.C.1.a	Kritische Kugelmasse von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen	67
Abb. 1.C.1.b	Kritische Kugelmasse von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen	68
Abb. 1.C.2.a	Kritisches Kugelvolumen von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen .	69
Abb. 1.C.2.b	Kritisches Kugelvolumen von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen .	70
Abb. 1.C.3.a	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen	71
Abb. 1.C.3.b	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen	72

Abb. 1.C.4.a	Kritische Schichtdicke von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen	73
Abb. 1.C.4.b	Kritische Schichtdicke von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen	74
Abb. 1.C.5.a	Moderationsverhältnis von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen	75
Abb. 1.C.5.b	Moderationsverhältnis von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen	76
Abb. 1.C.6	Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen	77
Abb. 1.C.7	kleinste kritische Urankonzentration von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen	78
Abb. 1.C.8	Maximaler infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen UO_2F_2 -Wasser-Systemen	79
Abb. 1.F.1	Kritische Kugelmasse von Uranylinitrat-Wasser-Systemen	84
Abb. 1.F.2	Kritisches Kugelvolumen von homogenen Uranylinitrat-Wasser-Systemen	85
Abb. 1.F.3	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Uranylinitrat-Wasser-Systemen	86
Abb. 1.F.4	Kritische Schichtdicke von homogenen Uranylinitrat-Wasser-Systemen	87
Abb. 1.F.5	Moderationsverhältnis von homogenen Uranylinitrat-Wasser-Systemen	88
Abb. 1.F.6	Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen Uranylinitrat-Wasser-Systemen	89
Abb. 1.F.7	Kleinste kritische Konzentration von homogenen Uranylinitrat-Wasser-Systemen	90
Abb. 1.F.8	Maximaler infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen Uranylinitrat-Wasser-Systemen	91
Abb. 1.F.16	Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen Uranylinitrat-Wasser-Systemen mit Borsäure-Vergiftung	92
Abb. 1.G.1	Kritische Kugelmasse von homogenen AUC-Wasser-Systemen	97

Abb. 1.G.2	Kritisches Kugelvolumen von homogenen AUC-Wasser-Systemen	98
Abb. 1.G.3	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen AUC-Wasser-Systemen	99
Abb. 1.G.4	Kritische Schichtdicke von homogenen AUC-Wasser-Systemen	100
Abb. 1.G.5	Moderationsverhältnis von homogenen AUC-Wasser-Systemen	101
Abb. 1.G.6	Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen AUC-Wasser-Systemen	102
Abb. 1.G.7	Kleinste kritische Konzentration von homogenen AUC-Wasser-Systemen	103
Abb. 1.G.8	Maximaler infiniten Multiplikationsfaktor von homogenen AUC-Wasser-Systemen	104
Abb. 1.H.1	Kritische Kugelmasse von homogenen ADU-Wasser-Systemen	108
Abb. 1.H.2	Kritisches Kugelvolumen von homogenen ADU-Wasser-Systemen	109
Abb. 1.H.3	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen ADU-Wasser-Systemen	110
Abb. 1.H.4	Kritische Schichtdicke von homogenen ADU-Wasser-Systemen	111
Abb. 1.H.5	Moderationsverhältnis von homogenen ADU-Wasser-Systemen	112
Abb. 1.H.6	Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen ADU-Wasser-Systemen	113
Abb. 1.H.7	Kleinste kritische Urankonzentration von homogenen ADU-Wasser-Systemen	114
Abb. 1.H.8	Maximaler infiniten Multiplikationsfaktor von homogenen ADU-Wasser-Systemen	115
Abb. 1.I.1	Kritische Kugelmasse von homogenen Urantrioxid-Wasser-Systemen	120
Abb. 1.I.2	Kritisches Kugelvolumen von homogenen Urantrioxid-Wasser-Systemen	121
Abb. 1.I.3	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Urantrioxid-Wasser-Systemen	122
Abb. 1.I.4	Kritische Schichtdicke von homogenen Urantrioxid-Wasser-Systemen	123

Abb. 1.I.5	Moderationsverhältnis von homogenen Urantrioxid-Wasser-Systemen	124
Abb. 1.I.6	Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen Urantrioxid-Wasser-Systemen	125
Abb. 1.I.7	Kleinste kritische Konzentration von homogenen Urantrioxid-Wasser-Systemen	126
Abb. 1.I.8	Maximaler infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen Urantrioxid-Wasser-Systemen	127
Abb. 3.B.3	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Urandioxid-Thoriumdioxid-Wasser-Systemen	135
Abb. 3.B.4	Kritische Schichtdicke von homogenen Urandioxid-Thoriumdioxid-Wasser-Systemen	136
Abb. 3.B.13	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Urandioxid-Thoriumdioxid-Isopropanol-Systemen	137
Abb. 3.B.14	Kritische Schichtdicke von homogenen Urandioxid-Thoriumdioxid-Isopropanol-Systemen	138
Abb. 5.A.1	Kritische Kugelmasse von homogenen U(93)-Metall-Graphit-Systemen	141
Abb. 5.A.2	Kritisches Kugelvolumen von homogenen U(93)-Metall-Graphit-Systemen	142
Abb. 5.A.5	Moderationsverhältnis $C/^{235}\text{U}$ von homogenen U(93)-Metall-Graphit-Systemen	143
Abb. 5.A.6	Infiniter Multiplikationsfaktor von homogenen U(93)-Metall-Graphit-Systemen	144
Abb. 5.A.11	Kritische Kugelmasse von homogenen Uranmetall-Graphit-Systemen	145
Abb. 5.A.12	Kritisches Kugelvolumen von homogenen Uranmetall-Graphit-Systemen	146
Abb. 5.B.1	Kritische Kugelmasse von homogenen Urandioxid-Graphit-Systemen mit Graphitreflektor	148

Abb. 5.B.2	Kritische Volumen von homogenen Urandioxid-Graphit-Systemen mit Graphitreflektor	149
Abb. 5.B.5	Moderationsverhältnis C/U_{gesamt} von homogenen Urandioxid-Graphit-Systemen	150
Abb. 5.B.11	Kritische Kugelmasse von homogenen Urandioxid-Graphit-Systemen mit Wasserreflektor	151
Abb. 5.B.12	Kritische Volumen von homogenen Urandioxid-Graphit-Systemen mit Wasserreflektor	152
Abb. 7.B.1	Kritische Kugelmasse von homogenen Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systemen	156
Abb. 7.B.2	Kritisches Kugelvolumen von homogenen Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systemen	157
Abb. 7.B.3	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systemen	158
Abb. 7.B.4	Kritische Schichtdicke für homogene Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme	159
Abb. 7.B.5	Moderationsverhältnis für homogene Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme	160
Abb. 7.B.6	Infiniter Multiplikationsfaktor für homogene Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme	161
Abb. 7.B.11	Kritische Kugelmasse von homogenen Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systemen	162
Abb. 7.B.12	Kritisches Kugelvolumen von homogenen Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systemen	163
Abb. 7.B.13	Kritischer Zylinderdurchmesser von homogenen Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systemen	164
Abb. 7.B.14	Kritische Schichtdicke für homogene Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme	165

Abb. 7.B.21	Verhältnis kritischer Werte für homogene Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme mit starkem Betonreflektor zu kritischen Werten mit starkem Wasserreflektor	166
Abb. 9.B.3.a	Kritischer Zylinderdurchmesser für homogene Graphit-wassermoderierte Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme	169
Abb. 9.B.3.b	Kritischer Zylinderdurchmesser für homogene Graphit-wassermoderierte Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme	170
Abb. 9.B.4.a	Kritische Schichtdicke für homogene Graphit-wassermoderierte Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme	171
Abb. 9.B.4.a	Kritische Schichtdicke für homogene Graphit-wassermoderierte Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme	172
Abb. 9.B.6	Infiniter Multiplikationsfaktor für homogene Graphit-wassermoderierte Uran-Thoriumoxid-Graphit-Systeme	173

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.A.A	Grundlegende Kritikalitätsdaten für homogene ^{235}U -Wasser-Systeme unter voller Wasserreflexion (Daten aus den 1970ern)	2
Tab. 1.A.B	Kleinste kritische Kugelmasse für homogene ^{235}U -Wasser-Systeme mit verschiedenen Reflektoren	3
Tab. 1.B.A	Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene sphärische Urandioxid-Wasser-Systeme bei reaktivster Urankonzentration	14
Tab. 1.B.B	Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene Urandioxid-Wasser-Systeme in Zylinder- und Schichtgeometrie bei reaktivster Urankonzentration	15
Tab. 1.C.A	Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene UO_2F_2 -Wasser-Systeme bei reaktivster Urankonzentration	66
Tab. 1.F.A	Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene sphärische $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ -Wasser-Systeme bei reaktivster Urankonzentration	82
Tab. 1.F.B	Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ -Wasser-Systeme in Zylinder- und Schichtgeometrie bei reaktivster Urankonzentration	83
Tab. 1.G.A	Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene sphärische $(\text{NH}_4)_4\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$ -Wasser-Systeme bei reaktivster Urankonzentration	95
Tab. 1.G.B	Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene $(\text{NH}_4)_4\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3$ -Wasser-Systeme in Zylinder- und Schichtgeometrie bei reaktivster Urankonzentration	96
Tab. 1.H.A	Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene sphärische ADU-Wasser-Systeme bei reaktivster Urankonzentration	106
Tab. 1.H.B	Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene ADU-Wasser-Systeme in Zylinder- und Schichtgeometrie bei reaktivster Urankonzentration	107
Tab. 1.I.A	Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene sphärische UO_3 -Wasser-Mischungen bei reaktivster Urankonzentration	118

Tab. 1.I.B	Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogene UO_3 -Wasser-Systeme in Zylinder- und Schichtgeometrie bei reaktivster Urankonzentration	119
Tab. 2.B.A	Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogenisierte sphärische UO_2 -Stab-Wasser-Systeme bei reaktivstem Stabdurchmesser und reaktivstem Moderationsverhältnis	130
Tab. 2.B.B	Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für homogenisierte UO_2 -Stab-Wasser-Systeme in Zylinder- und Schichtgeometrie bei reaktivstem Stabdurchmesser und reaktivstem Moderationsverhältnis	131
Tab. 2.B.C	Vergleich von experimentellen Daten mit HAMMER-Berechnungen für niedrig angereicherte Urandioxidstab-Wasser-Systeme (aus /CLA 66/, Tab. II)	132
Tab. 7.B.A	Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für graphitmoderierte, homogene $\text{UO}_2(10\%)\text{ThO}_2(90\%)$ -Graphit-Systeme	154
Tab. 7.B.B	Kritische und sichere Kritikalitätsdaten für graphitmoderierte, homogene $\text{UO}_2(10\%)\text{ThO}_2(90\%)$ -Graphit-Systeme	155
Tab. 9.B.A	Kritische Kritikalitätsdaten für homogene $\text{UO}_2(10\%)\text{ThO}_2(90\%)$ -Graphit-Wasser-Systeme	168

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-944161-61-7